

COLUMNAS LIQUIDAS
EN CONDICIONES DE INGRAVIDEZ

1978
INFORME FINAL

Madrid, Marzo 1979

COLUMNAS LIQUIDAS EN CONDICIONES DE INGRAVIDEZ

Expediente PDP 11/78

Convenio de Investigación entre la Comisión Nacional de Investigación del Espacio (CONIE) y la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), desarrollado por el Laboratorio de Aerodinámica y Mecánica de Fluidos (LAMF) de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos (ETSIA) durante el año 1978.

Responsable del trabajo	I. Da-Riva de la Cavada
Colaboradores	I. Martínez Herranz
	J. Meseguer Ruiz
	A. Sanz Andrés

I N D I C E

Página

MEMORIA	iv
1. EL MODULO DE FISICA DE FLUIDOS (FPM)	1
1.1. CONFIGURACION INICIAL DE LOS EXPERIMENTOS	8
2. FORMACION Y ENTRENAMIENTO DE LOS ESPECIALISTAS DEL SPACELAB	13
2.1. DESCRIPCION SECUENCIAL DEL EXPERIMENTO 1-ES-331	16
2.2. ESTUDIO DE UN SIMULADOR ELECTRONICO	27
3. PRESENTACION DE DATOS	31
3.1. IMAGENES	33
3.1.1. Lámpara	34
3.1.2. Distribución de luz entre los sistemas de iluminación	37
3.1.3. Sistema de iluminación del plano meridiano ..	38
3.1.4. Sistema de iluminación de fondo	38
3.1.5. Sistema de captación de imagen	40
3.1.6. Cámaras de cine	46
3.1.7. Trazadores	47
3.1.8. Películas	49
3.1.9. Fotografías	51
3.2. DATOS DE FUNCIONAMIENTO	51
3.2.1. Señales	53
3.2.2. Sistema de adquisición de datos	56
4. ESTUDIO SOBRE EL ANALISIS DE LA INFORMACION	67
4.1. CLASIFICACION	70
4.2. ANALISIS CUALITATIVO VISUAL	72
4.3. ANALISIS CUANTITATIVO MANUAL	73
4.3.1. Selección de la información	73
4.3.2. Digitalización manual	73

	Página
4.3.3. Tratamiento automático de datos	76
4.3.3.1. Determinación del campo de velocidades	76
4.3.3.2. Determinación de la forma de la su- perficie externa de la zona	91
4.4. ANALISIS CUANTITATIVO AUTOMATICO	102
4.4.1. Entrada de información	105
4.4.2. Tratamiento de imágenes	106
4.4.3. Proceso de datos	115
4.4.4. Obtención de resultados	116
APENDICE	
FORMAS DE EQUILIBRIO Y ESTABILIDAD DE LAS ZONAS LIQUIDAS FLOTANTES ENTRE DISCOS DIFERENTES	117

—=ooOoo=—

MEMORIA

La Comisión Nacional de Investigación del Espacio viene subvencionando, desde 1975, las investigaciones que en este Laboratorio se realizan sobre "COLUMNAS LIQUIDAS EN INGRAVIDEZ".

Además del fin puramente científico de estos trabajos, el objetivo concreto al que están encaminados es el de asesorar en el comportamiento de zonas líquidas flotantes de uso en laboratorios espaciales.

En este sentido podemos mencionar la labor desarrollada en este Laboratorio durante los últimos años, primeramente como asesoría científica para el diseño de un Módulo de Experimentación de columnas líquidas flotantes para el laboratorio espacial SPACELAB, así como la preparación de un experimento, el 1-ES-331, para realizarse en el mencionado módulo, que se utilizará conjuntamente con otras universidades y centros de investigación europeos en la primera misión del SPACELAB en Agosto de 1981.

La importancia que van adquiriendo estas investigaciones y la gran responsabilidad que lleva anexa nuestra participación en el laboratorio espacial, nos movió a ampliar el esfuerzo dedicado, abriendo a examen nuevas áreas relacionadas con la experimentación, y que no pudieron ser previstas anteriormente. Por ejemplo, los problemas de visualización, captación de imágenes e interpretación de las mismas, aparecen como puntos clave en el estudio de los resultados previsibles. En efecto, toda experimentación, además de una profunda fundamentación teórica, necesita un conocimiento total de las técnicas e instrumentación que le van a servir de soporte para la obtención de resultados.

Por este motivo, se ha puesto especial énfasis en la coordinación y adecuación del experimento español al Módulo de Física de Fluidos. Los problemas son grandes, puesto que se trata de llevar a cabo una serie de ensayos en un aparato aún en construcción, que no ha sido desarrollado en este Laboratorio, en la primera nave espacial europea tripulada.

De entre los múltiples contactos internacionales habidos últimamente (con los otros cinco experimentadores, con los representantes italianos responsables de la financiación del equipo experimental, con los representantes de la Agencia Espacial Europea y con los astronautas candidatos) hay que destacar la reciente reunión general de todos los grupos interesados, celebrada en Londres, y en la que se tomaron las decisiones pertinentes para una colaboración más eficaz.

Por último, y como contribución de este Laboratorio a la difícil tarea de promocionar la investigación en general en España, y principalmente la investigación aeroespacial, este Laboratorio ha preparado una publicación divulgativa de interés general, para su difusión entre los centros oficiales y privados de investigación.

1. EL MODULO DE FISICA DE FLUIDOS (FPM)

1. EL MODULO DE FISICA DE FLUIDOS (FPM).

A bordo del Spacelab se realizarán, durante la primera misión, unos sesenta experimentos relacionados con diversos campos de la ciencia (astrofísica, observación de la Tierra, materiales y biología) dado el carácter multidisciplinario de este primer vuelo.

Uno de los experimentos, propuesto y desarrollado por este Laboratorio (Lamf-ETSIA), será el denominado 1-ES-331, cuyo propósito es el estudio de las formas de equilibrio, estabilidad e hidrodinámica de las zonas líquidas flotantes. Para este experimento y otros cinco más, que constituyen la parte de Mecánica de Fluidos del área de Ciencias de los Materiales en la primera misión Spacelab, se está construyendo actualmente un módulo de experimentación de uso múltiple: el Módulo de Física de Fluidos (FPM).

El FPM, cuyos gastos de desarrollo han sido cubiertos por el gobierno italiano, será uno de los equipos de experimentación a disposición de la comunidad científica internacional. En este aparato se podrán ensayar masas líquidas confinadas únicamente por la tensión superficial (zonas flotantes, gotas) o contenidas en recipientes, en condiciones de gravedad reducida. Un ejemplo del futuro aprovechamiento del FPM lo ofrece la lista de experimentos a realizar durante el primer vuelo que se resumen en la Tabla 1.1; estos experimentos se harán al final de la misión, cuando hayan finalizado los de otras áreas, con el fin de disminuir en lo posible las interferencias debidas a otros equipos del laboratorio espacial.

Los trabajos de definición del Módulo comenzaron en 1975 con un anteproyecto de la empresa española CASA, S.A. en colaboración con este Laboratorio (Lamf-ETSIA); el proyecto definitivo y la construcción quedó posteriormente a cargo de la empresa italiana FIAT

Tabla 1.1. Experimentos a realizar en el Módulo de Física de Fluidos en el primer vuelo del Spacelab.

Codigo (1-ES-)	Investigador Principal	EXPERIMENTO
330	J.P.B. Vreeburg (Holanda)	Movimiento acoplado de sistemas sólido-líquido.
327	J.M. Haynes (Inglaterra)	Cinetica del mojado de sólidos.
329	J.F. Padday (Inglaterra)	Fuerzas moleculares en ingravidez.
331	I. Da-Riva (España)	Estabilidad de las zonas líquidas flotantes.
328	L.G. Napolitano (Italia)	Convección por gradiente de <u>ten</u> sión superficial.
326	H. Rodot (Francia)	Amortiguamiento viscoso y resonancias.

donde en la actualidad, se está ultimando el modelo de ingeniería. En la Fig. 1.1 se muestra una maqueta del FPM en su configuración actual, como aclaración en la Fig. 1.2 se han esquematizado los elementos más significativos en el funcionamiento del Módulo que consiste, básicamente, en un par de discos entre los que se puede colocar (inyectando a través de uno de ellos) una masa de líquido cuyo comportamiento se desea estudiar bajo la acción de las fuerzas de tensión superficial y de otros efectos impuestos (perturbaciones mecánicas, campos eléctricos, gradientes térmicos, etc.).

Uno de los discos (donde se realiza la inyección de liquido) puede desplazarse axialmente y girar; el otro (disco de trabajo) puede desplazarse lateralmente, girar y vibrar axialmente. El disco de inyección lleva incorporada una resistencia eléctrica, estando ambos discos aislados eléctricamente; de esta forma es posible estable



Fig. 1.1. Maqueta del Módulo de Física de Fluidos

- A,B, Cámaras de cine
- C, Carcasa del disco de alimentación
- D, Depósito del líquido de trabajo
- E, Carcasa del disco de trabajo
- F, Posicionador lateral del disco de trabajo
- G, Cámara de ensayos
- H, Plataforma soporte
- L, Guías
- M₁, Motor para el desplazamiento axial del depósito D (no visible en la figura)
- M₂, Motor para el desplazamiento axial del disco de alimentación (no visible en la figura)
- M₃, Motor para la rotación del disco de alimentación
- M₄, Motor para la rotación del disco de trabajo (apenas visible en la figura)
- M₅, Motor para la vibración axial del disco de trabajo
- M₆, Motor del separador por centrifugación
- M₇, Motor del ventilador
- O_C, Separador por centrifugación
- O_F, Ventilador
- O_R, Filtro del aire.

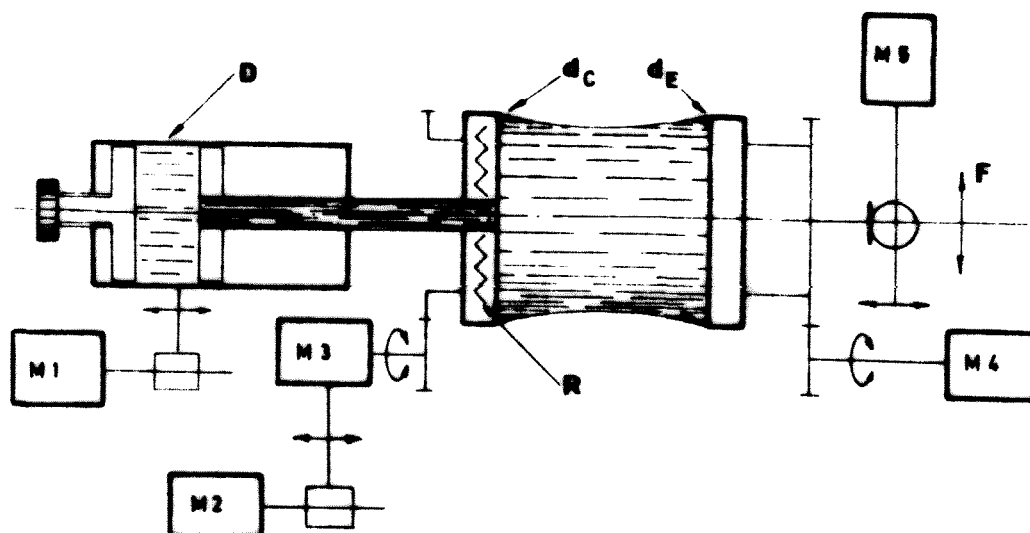


Fig. 1.2. Esquema de funcionamiento del FPM. d_C : disco de alimentación; d_E : disco de trabajo; R: resistencia eléctrica. El resto de los rótulos tiene el mismo significado que en la figura 1.1.

cer gradientes de temperatura en la zona y diferencias de potencial entre los discos.

El Módulo de experimentación dispone también de un sistema de visualización y captación de imagen. La visualización se realiza por medio de trazadores sólidos (Eccospheres: microesferas huecas, de vidrio o cerámica). El Sistema de captación de imagen, Fig. 1.3 permite registrar simultáneamente el campo de velocidades y la forma externa de la masa líquida en experimentación; la disposición de las cámaras de cine y el sistema de iluminación están diseñados de modo que una de las cámaras proporcione la visión en un plano meridiano y la otra en un plano paralelo a los discos. Obviamente, este sistema es el más crítico, pues toda la información sobre los experimentos - deberá obtenerse posteriormente en Tierra a partir de estas imágenes. En la actualidad, los mayores esfuerzos de los constructores del FPM están centrados en el perfeccionamiento de este sistema.

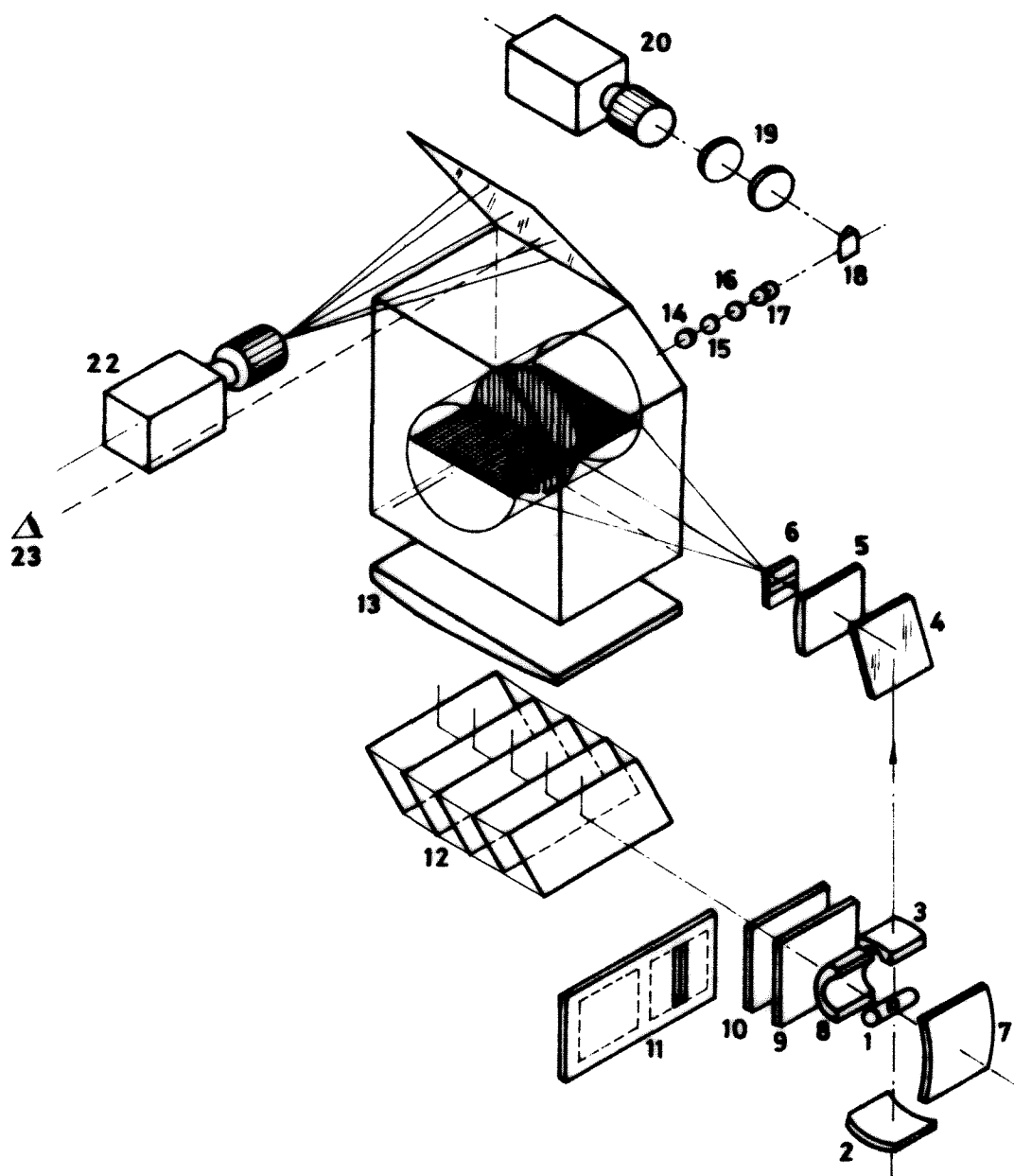


Fig. 1.3. Sistema de visualización y registro de imagen del FPM.

- | | |
|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 1, Lámpara | 12, Caja de prismas |
| 2,7, Espejos esféricos | 14, Lente doble acromática |
| 3,8, Meniscos de Amici | 15, Lente triplete |
| 4, Espejo-filtro de infrarrojos | 16, Lente focal |
| 5,13, Lentes cilíndricas (de eje paralelo al eje de rotación) | 17, Lentes focales (para la corrección de desalineaciones debidas a vibraciones) |
| 6, Diafragma | 18, Prisma |
| 9, Filtro de infrarrojos | 19, Lentes de enfoque |
| 10, Lente de Fresnel | 20,22, Cámaras |
| 11, Filtro deslizante | 21, Espejo |
| | 23, Posición del operador. |

Además, el FPM lleva incorporado un sistema de limpieza de la cámara de ensayos mediante arrastre por aire (Fig. 1.4), que también puede ser utilizado para enfriar la cámara tras un excesivo calentamiento debido al sistema de iluminación o al calor producido en algunos experimentos.

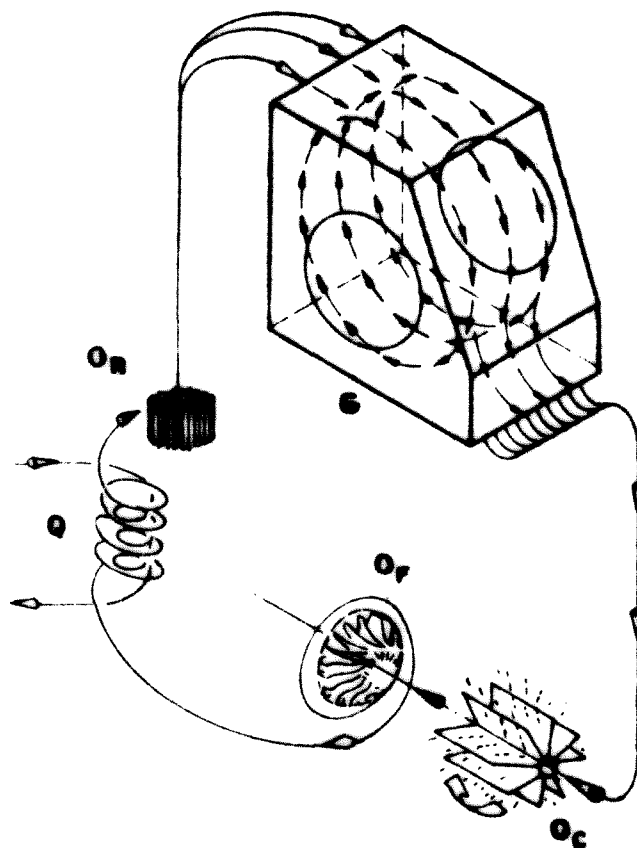


Fig. 1.4. Sistema de limpieza y refrigeración de la cámara de ensayos. O_C: separador centrífugo; O_F: ventilador; O_R: filtro; G: cámara de ensayos; Q: cambiador de calor agua/aire.

El FPM irá alojado, a bordo del Spacelab, en uno de los bancos de trabajo asignados a la Ciencia de los Materiales (MSDR: Materials Science Double Rack). El Módulo irá montado sobre guías deslizantes de forma que, cuando sea necesario, todo el FPM quede

accesible y fácilmente manipulable tal como se muestra en la Fig.1.5. Los órganos de control y mando irán alojados en un panel frontal colocado a la altura de la plataforma soporte, donde estarán los selectores de actuación, luces de aviso y contadores digitales. El FPM - irá dotado de un sistema de apoyo de gran rigidez diseñado para soportar las cargas durante el despegue y aterrizaje, y otro sistema - más flexible para amortiguar las posibles vibraciones durante las operaciones en vuelo.

En las Tablas 1.2 y 1.3 se muestran, respectivamente, las características técnicas más significativas del FPM y las señales de mando y control disponibles en el panel de mando del FPM.

1.1. CONFIGURACION INICIAL EN LOS EXPERIMENTOS

Una vez en órbita se procederá a la realización de los seis experimentos mencionados anteriormente (Tabla 1.1). Los experimentos se desarrollarán con el Módulo sin desplegar, es decir, situado en el interior del banco de trabajo. Dado que, en cierta medida, cada experimento precisa su propio utillaje se ha definido una configuración inicial a partir de la cual deben empezar las especificaciones de los distintos ensayos, la configuración inicial estándar se puede resumir en las siguientes normas:

- FPM desplegado
- Envoltura externa de la cámara de ensayos en posición abierta
- Separación máxima entre las placas
- Sin discos
- Sin depósito
- Sin película en las cámaras

- Desconectado de la red
- Todo completamente limpio.

Obviamente la configuración final en cada experimento ha de coincidir con la inicial, y debe estar bien definida para facilitar el uso compartido e independiente de este aparato por los diversos investigadores. Esto no quiere decir que en la realidad se vaya a proceder exactamente así; en la etapa final de planificación e integración de una serie de experimentos se procurará que se puedan solapar unas operaciones con otras con el consiguiente ahorro de tiempo, por ejemplo: no se descargarán las cámaras de cine una vez acabado un experimento si todavía queda película suficiente para filmar el experimento siguiente, ni se cambiará el depósito del líquido de trabajo si en dos o más experimentos consecutivos se utiliza el mismo líquido, ni los discos si no es necesario.

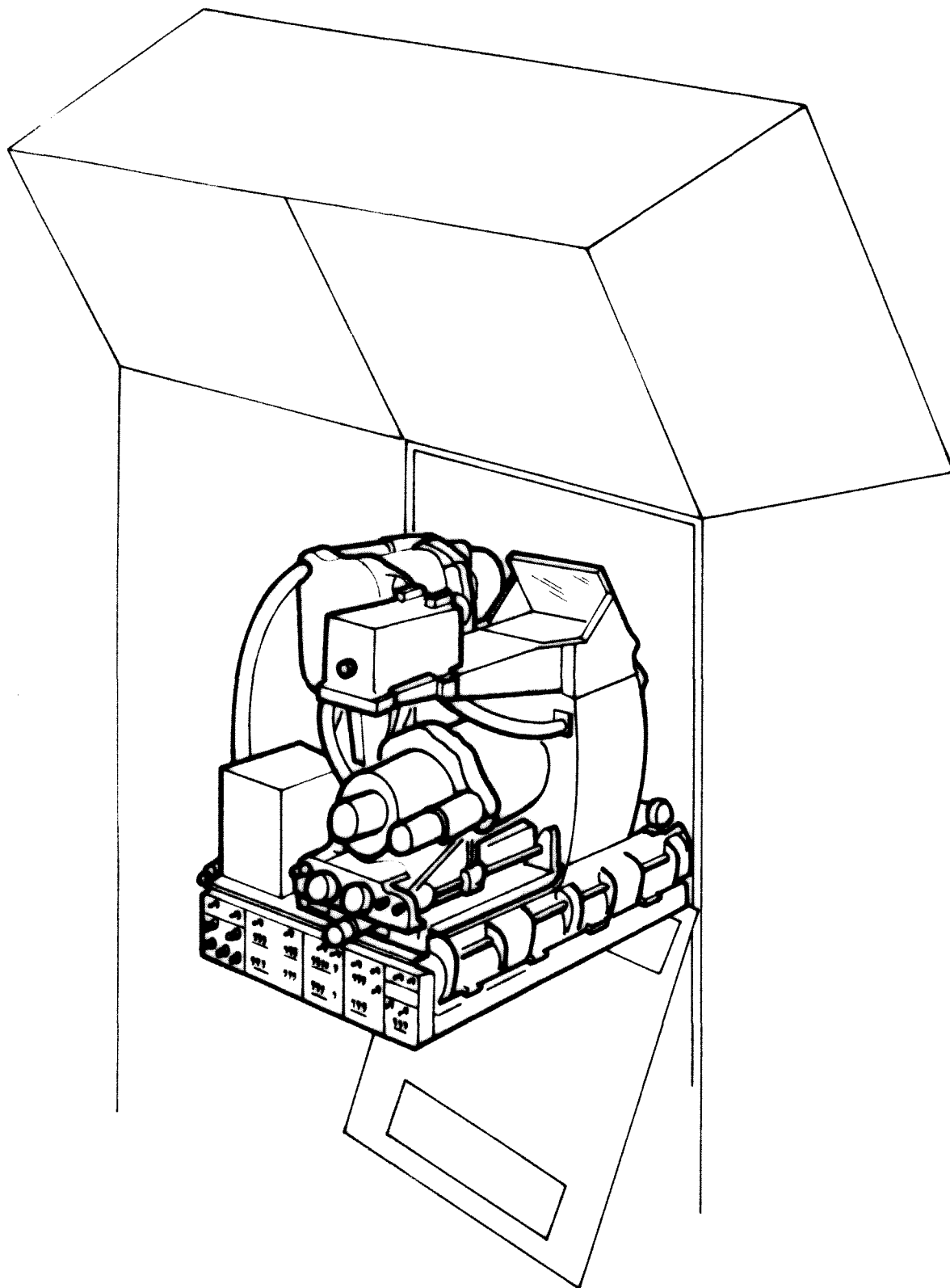


Fig. 1.5. Posición del Módulo de Física de Fluidos (desplegado) en el banco de trabajo.

Tabla 1.2. Datos técnicos del Módulo de Física de Fluidos (FPM).

Estructura soporte	Moldeada
Material	Aleación de Magnesio
Zona de ensayo	
Longitud máxima	130 mm
Diámetro máximo	100 mm
Separación entre discos ...	De 0 a 130 mm
. Precisión	+ 0.1 mm
Velocidad de rotación	De - 100 a + 100 r.p.m.
. Precisión	± 1% (±0.1 r.p.m. máx.)
Desalineación máxima entre ejes	0.01°
Precisión en la excentricidad	± 0.01 mm
Temperatura	De 18 a 60 °C
Potencial eléctrico entre discos	De - 100 a + 100 V DC
Disco de inyección	
Material	Aluminio
Diámetros disponibles	40 y 60 mm
Disco de trabajo *	
Material	Acero
Diámetros disponibles	40, 60 y 100 mm
Desplazamiento lateral (manual)	De 0 a 2 mm
Vibración axial	
. Amplitud	De 0.05 a 0.5 mm
. Frecuencia	De 0.1 a 2 Hz
Suministro de líquido	
Capacidad del depósito	1300 cm ³
Diámetro del orificio de inyección	6 mm
Velocidad de inyección	De .5 a 6 cm ³ /seg.
Sistema de visualización	
Visualización de la forma externa	Transparencia
Visualización del flujo interno	Trazadores sólidos
Registro de imagen	2 cámaras de cine (16 mm)
. Resolución prevista ..	0.03 mm

* Datos correspondientes al conjunto de discos estándar.

Existen discos especiales.

Tabla 1.3. Características de las señales enviadas por el FPM a la consola central del MSDR.

DESIGNACION	DESCRIPCION	ESCALA DE MEDIDA				ESCALA DE VOLTAJES		Nº DE BITS SIGNIFICATIVOS	MUESTREO (1) (Veces/seg)	USO (2)
		MIN	MAX	PRECISION	UNIDAD	MIN	MAX			
	<u>SEÑALES DE AVISO</u>									
X ₁	Disco 1 girando							1	50	1,2
X ₂	Disco 1 en régimen							1	50	1,2
X ₃	Dirección rotación disco 1							1	50	1
X ₄	Disco 2 girando							1	50	1,2
X ₅	Disco 2 en régimen							1	50	1,2
X ₆	Dirección rotación disco 2							1	50	1
X ₇	Disco 1 desplazándose							1	50	1,2
X ₈	Disco 1 en posición							1	50	1,2
X ₉	Depósito desplazándose							1	50	1,2
X ₁₀	Depósito en posición							1	50	1,2
X ₁₁	Disco 2 vibrando							1	50	1,2
X ₁₂	Vibración disco 2 en régimen							1	50	1,2
X ₁₃	Disco 2 calentándose							1	50	1,2
X ₁₄	Temperatura disco 2 alcanzada							1	50	1
X ₁₅	Diferencia de potencial actuando							1	50	1,2
X ₁₆	Cámara 1 en marcha							1	50	1
X ₁₉	Impulso de disparo							1	50	1
	<u>SEÑALES ANALOGICAS</u>									
A ₁	Amplitud vibración disco 2	0.0	0.5	±1.5	um	0	5	8	50	1,2,4
A ₂	Desplazamiento lateral disco 2	0.0	2	±5	um	0	2	8	50	1,2,4
A ₃	Difer. de potencial entre discos	-100	+100	±1	V	-10	+10	8	50	1,2
A ₄	Temperatura del termistor 1	20	60	±0.5	°C	2	6	6	50	1,2
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
A ₁₁	Temperatura del termistor 8	20	60	±0.5	°C	2	6	6	50	1,2
A ₁₂	Velocidad rotación disco 1	0	+100	±0.1	rpm	0	10	9	50	1,2
A ₁₃	Velocidad rotación disco 2	0	+100	±0.1	rpm	0	10	9	50	1,2
A ₁₆	Frecuencia vibración disco 2	0	2	±0.002	cps	0	2	9	50	1,2
	<u>SEÑALES DIGITALES (3)</u>									
X ₁₇	Posición disco 1	0	130	±0.05	mm			11	50	1,2
X ₁₈	Posición depósito	0	130	±0.05	mm			11	50	1,2

- (1) Sólo se realiza el muestreo de las señales de funcionamiento (lámparas) y las A₁, A₂ para su verificación (o en lugar de éstas últimas aquellas que se hayan seleccionado), excepto cuando hay un impulso de disparo en que se muestrean las que correspondan al modo de almacenamiento en que se opere.
- (2) 1, almacenamiento; 2, control automático; 3, verificación; 4, control manual. En el Modo Normal se almacenan todas las señales cada impulso de disparo, mientras que en el Modo Selectivo sólo se almacenan las señales seleccionadas, cada cierto número de impulsos.
- (3) Codificadas en BCD.

2. FORMACION Y ENTRENAMIENTO DE LOS ESPECIALISTAS
DEL SPACELAB

2. FORMACION Y ENTRENAMIENTO DE LOS ESPECIALISTAS DEL SPACELAB.

Para algunos experimentos (medicina) los astronautas son sujetos pacientes y, por tanto, parte contributiva de los mismos. Para los demás, la intervención de los astronautas es la solución a inacabables problemas de logística. Muchos experimentos espaciales se podrían diseñar para que funcionasen automáticamente, pero a costa de que la secuencia se interrumpiese (o continuase fuera de control) ante cualquier imprevisto; sólo la insustituible capacidad de respuesta del elemento humano frente a sucesos inesperados ofrece las requeridas garantías de fiabilidad.

El ambiente espacial impone una serie de cargas físicas y psíquicas a los astronautas: mareos, somnolencia, agotamiento, claustrofobia, tensión nerviosa, etc. Los individuos que vayan a trabajar en el Spacelab deberán estar preparados para afrontar estas cargas a través de un programa de entrenamiento y acomodación, pues en definitiva el éxito de la misión dependerá de la capacidad del personal de a bordo para supervisar y controlar la realización de los diversos experimentos.

La primera misión Spacelab tiene asignada una tripulación de seis personas: comandante, piloto, dos navegantes y dos especialistas, los cuatro primeros pertenecientes al Cuerpo de Astronautas de la NASA y los dos últimos, uno europeo y otro americano, reclutados entre las comunidades científicas de Europa y USA.

Por parte europea se han seleccionado para especialistas tres candidatos (de nacionalidad suiza, alemana y holandesa, respectivamente), que junto a otros dos norteamericanos seguirán un programa especial de entrenamiento. De este programa, la NASA se ocupará del entrenamiento de los candidatos como astronautas, quedando bajo

la responsabilidad de ESA la formación de los mismos en las funciones específicas de la misión; en consecuencia, para el primer vuelo del Spacelab, ESA/SPICE (Spacelab Payload Integration and Coordination in Europe) se encargará de la formación y entrenamiento de los candidatos en los aspectos científicos de la misión. Acabado el período de entrenamiento se seleccionarán dos de los cinco candidatos, que serán los responsables del funcionamiento de los equipos de experimentación en el laboratorio espacial.

El programa preparado para este fin por ESA/SPICE comprende de las siguientes fases:

- 1^a. Estudio de la literatura relacionada con los experimentos para una familiarización con los objetivos científicos de cada uno de ellos.
- 2^a. Formación teórica, dirigida por los investigadores mediante coloquios seleccionados, seguida de discusiones sobre los experimentos entre los candidatos y los investigadores.
- 3^a. Visitas a algunos laboratorios con el fin de familiarizar a los candidatos con el equipo básico de los experimentos y con los instrumentos que deberán manejarse en órbita.
- 4^a. Entrenamiento global en un simulador pasivo.
- 5^a. Participación en las actividades de integración del Spacelab, seguido de un ejercicio de simulación de la misión.

Se desprende claramente de este programa que los investigadores han de aprovechar fundamentalmente las dos primeras fases - para lograr que los especialistas comprendan la naturaleza de sus experimentos.

En lo que atañe al experimento 1-ES-331, se ha elaborado

un plan de enseñanza para los especialistas, que incluye formación teórica y experimental.

Así, en la primera reunión mantenida en Londres y Bristol del 13 al 17 de Noviembre de 1978, entre los candidatos a especialistas y los investigadores en Física de Fluidos, se entregó y comentó con estos una Memoria sobre el experimento 1-ES-331 (junto con otras Memorias sobre el FPM y los demás experimentos a realizar en este Módulo durante la primera misión) y la descripción secuencial del mismo. Esta primera reunión fue dedicada también a demostraciones y experimentos con líquidos en el Surface Chemistry Laboratory de Kodak Ltd. (Harrow) cuyo propósito fue familiarizar a los especialistas con fenómenos específicos en el manejo de líquidos, similares a los que se presentarán a bordo del Spacelab durante la experimentación en el FPM.

En el apartado siguiente se muestra la programación realizada en el Lamf-ETSIA del experimento 1-ES-331. Al realizar esta programación secuencial se ha puesto especial cuidado en que el experimento quede perfectamente acoplado con los demás; es previsible, sin embargo, que el programa sufra con el tiempo ligeros cambios de acomodación según se vaya desarrollando el plan de integración y montaje de los diversos equipos del Spacelab.

2.1. DESCRIPCION SECUENCIAL DEL EXPERIMENTO 1-ES-331.

El experimento se divide en dos ensayos en los que, aunque las perturbaciones que se van a aplicar serán casi iguales, la respuesta será muy diferente pues en el primero se utilizará un líquido poco viscoso y en el segundo otro muy viscoso (unas doscientas veces más).

Se han previsto también en el programa pasos de carácter opcional para cubrir la posibilidad de fallo de algún otro experimento, lo que aliviaría las actuales limitaciones de tiempo (sólo se dispone de dos horas en total para nuestro experimento). En la Tabla 2.1 se resumen las principales operaciones previstas para ambos ensayos.

Tabla 2.1. Descripción de las operaciones a realizar para el experimento 1-ES-331.

Orden	Designación	Ensayo 1		Ensayo 2	
		Tiempo (min)	Imágenes (número)	Tiempo (min)	Imágenes (número)
1	PREPARACION	5	0	5	0
2	LLENADO	5	250	5	255
3	VIBRACION	5	250	5	255
4	ROTACION	5	250	5	255
5	CONTRARROTACION	5	250	5	255
6	ISORROTACION	5	250	5	255
7	DESALINEACION	2	50	2	60
8	PARADA	3	100	3	120
9	ROTURA *	3	250	3	300
10	RECOGIDA	5	550	5	450
11	LIMPIEZA	10	0	10	0
		53	2200	53	2205

* En caso de disponerse de más tiempo, se repetiría la filmación de la rotura, esta vez de manera manual y a gran velocidad de filmación.

La primera operación es de preparación, montaje de los discos y líquidos apropiados, y verificación.

La segunda es la etapa de llenado y formación de la columna líquida flotante mediante inyección de líquido combinada con la separación de los discos de tal forma que en todo instante (sucesión de estados de equilibrio) la configuración sea casi cilíndrica.

La tercera parte consiste en hacer vibrar sinusoidalmente uno de los discos para estudiar la transmisión y amortiguamiento de las oscilaciones.

En la cuarta se pone en rotación uno de los discos con el fin de analizar el problema del transporte de masa y cantidad de movimiento en la región del borde del disco.

El quinto paso es mantener en rotación el disco anterior y poner el otro en contrarrotación a la misma velocidad angular, para ver donde se sitúa la capa de cortadura intermedia.

En el sexto paso se ponen en isorrotación los discos.

La séptima operación es la única no-axilsimétrica, ya que se trata de desplazar lateralmente y paralelo a sí mismo uno de los discos una pequeña distancia (desalineación) estando los discos en isorrotación.

La fase octava es la de parada súbita de ambos discos y el estudio del transporte de cantidad de movimiento hasta la parada total del líquido.

El punto culminante de los ensayos es el apartado noveno, en el cual se produce la rotura controlada de la columna líquida. En este punto, la diferencia entre los dos ensayos es total: en el primer ensayo, la columna es de 40 mm de diámetro, y se estira (llenando, para conseguir una sucesión de formas cilíndricas) hasta la rotura ($L/D = \pi$); en el segundo ensayo, la columna es de 60 mm y tiene una longitud próxima al punto de cambio de modo de inestabilidad ($L/D \approx 2$), produciéndose la rotura por extrangulación de la garganta fluida que se forma al ir extrayendo líquido sin variar la separación entre los discos. En la Fig. 2.1 se muestra esquemáticamente el procedimiento de rotura en ambos casos, así como la sucesión de es-

tados en el llenado y rotura.

La operación número diez es algo diferente de un ensayo a otro, pero de lo que se trata en ambos es de aprovechar el vaciado de la zona (por aspiración desde el depósito) para filmar la unión de dos gotas (coalescencia); en el primer caso, y puesto que la rotura será no-simétrica, suponiendo que la gota mayor quede en el disco de alimentación y no se pierde mucho líquido (gotitas que por inercia saltan al romperse la columna), al ir extrayendo líquido en proporción "cilíndrica" ($dV = \frac{\pi D^2}{4} dl$) llega un momento en que ambas gotas se juntan. En el segundo caso se consigue la coalescencia simplemente aproximando las dos gotas sin variar el volumen.

La última operación, claro está, es la de desmontaje de - discos y depósito y limpieza general para dejar todo tal como estaba al principio.

En la Tabla 2.2 se describen paso a paso los movimientos que se acaban de exponer y que serán los incluidos en las instrucciones de manejo por los astronautas.

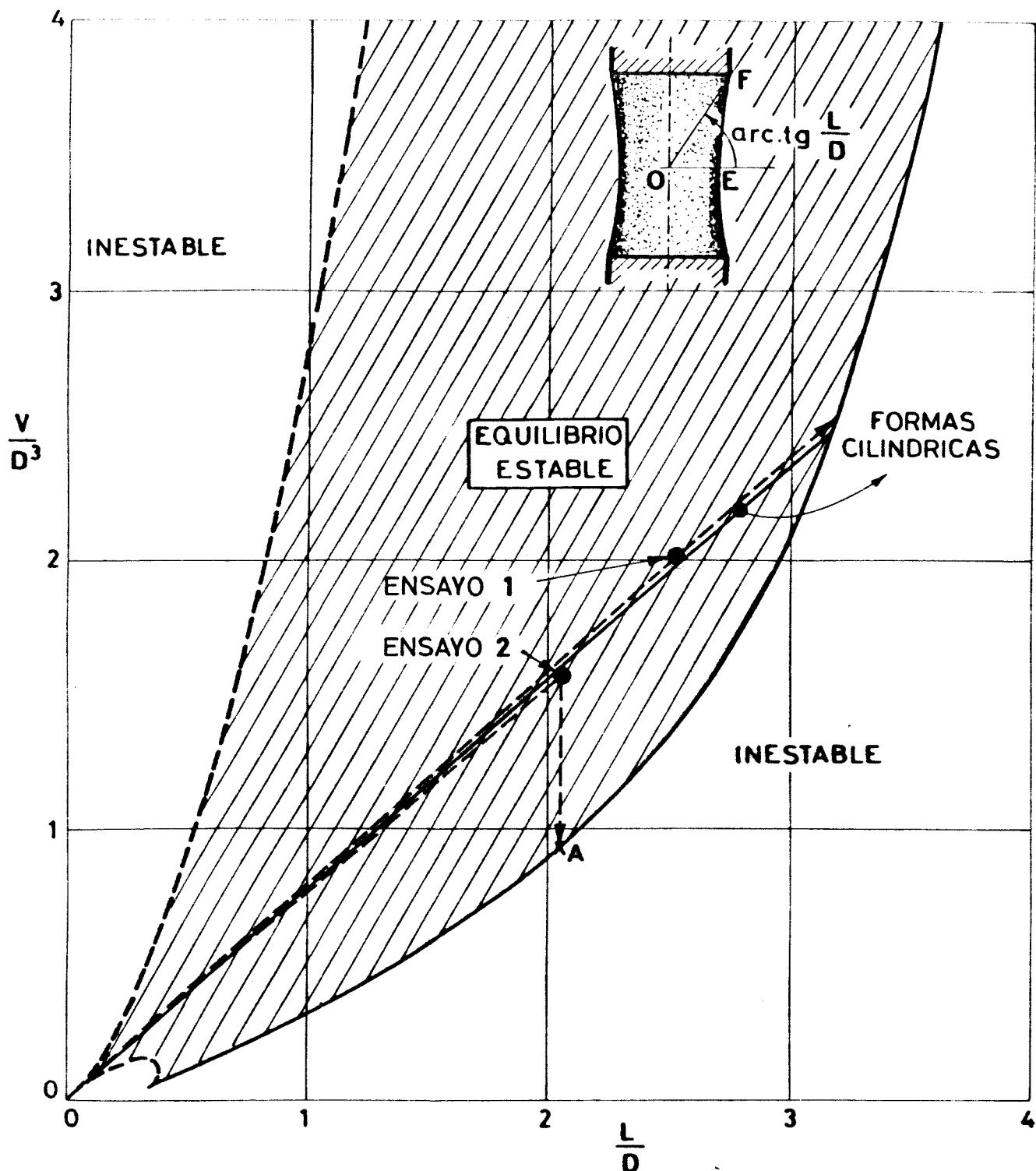


Fig. 2.1. Sucesión de estados de equilibrio correspondientes a la zona líquida flotante no perturbada para los ensayos 1 y 2 del experimento 1-ES-331 del primer vuelo del Spacelab.

Tabla 2.2. Descripción secuencial del experimento 1-ES-331.

PASO Nº	ENSAYO 1	ENSAYO 2
	1. PREPARACION	Idem
1.1	Verificación inicial	Idem
1.2	Carga de la cámara 1	Idem
1.3	-	Carga de la cámara 2
1.4	Montaje de los discos de 40 mm	Montaje de los discos de 60 mm
1.5	Carga del depósito DMS-5-T	Carga del depósito DMS-1000-T
1.6	Puesta a punto del sistema óptico	Idem
1.7	Introducción del módulo en el armario	Idem
1.8	Conexión a la red	Idem
1.9	Llenado manual conducto de inyección	Idem
1.10	Ajuste desplazamiento disco 1	Idem
	- Desde (mm) : 130.0	Idem
	- Hasta (mm) : 0.0	Idem
	- Velocidad (mm/seg): - .999	Idem
1.11	Ajuste desplazamiento depósito	Idem
	- Desde (mm) : 130.0	Idem
	- Hasta (mm) : 0.0	Idem
	- Velocidad (mm/seg): - .999	Idem
1.12	Empiece *	Idem
1.13	Verificación de la puesta a cero	Idem
	2. LLENADO	Idem
2.1	Ajuste desplazamiento disco 1	Idem
	- Desde (mm) : 0.0	Idem
	- Hasta (mm) : 100.0	- Hasta (mm) : 125.0
	- Velocidad (mm) : .500	Idem
2.2	Ajuste desplazamiento depósito	Idem
	- Desde (mm) : 0.0	Idem
	- Hasta (mm) : 84.0	- Hasta (mm) : 80.0
	- Velocidad (mm) : .420	- Velocidad (mm/seg): .320
2.3	Ajuste cámara 1	Idem
	- Velocidad (imag/seg): 1	- Velocidad (imag/seg): 2/3
	- Exposición (seg) : .5	- Exposición (seg) : .5
	- Diafragma : ?	- Diafragma : ?
	- Número de imágenes : 250	- Número de imágenes : 170

* La parada es automática al llegar al límite todos los parámetros ajustados.

Tabla 2.2. (Continuación)

PASO Nº	ENSAYO 1	ENSAYO 2
2.4	-	Ajuste cámara 2
	-	- Velocidad (imag/seg): 1/3
	-	- Exposición (seg) : .5
	-	- Diafragma : 2
	-	- Número de imágenes : 85
2.5	Empiece	Idem
2.6	Verificación visual de la forma cilíndrica	Idem
	3 VIBRACION	Idem
3.1	Ajuste mecanismo vibración	Idem
	- Amplitud (mm) : .5	- Amplitud (mm) : 1
	- Frecuencia (Hz) : .5	- Frecuencia (Hz) : 1
	- Aceleración (Hz/seg): 1	- Aceleración (Hz/seg): 1
3.2	Ajuste cámara 1	Idem
	- Número de imágenes : 250	- Número de imágenes : 170
3.3	-	Ajuste cámara 2
	-	- Número de imágenes : 85
3.4	Empiece *	Idem
	4. ROTACION	Idem
4.1	Ajuste rotación disco 1	Idem
	- Desde (rpm) : 0	Idem
	- Hasta (rpm) : 10	Idem
	- Aceleración (rpm/seg): 1	Idem
4.2	Ajuste cámara 1	Idem
	- Número de imágenes : 250	- Número de imágenes : 170
4.3	-	Ajuste cámara 2
	-	- Número de imágenes : 85
4.4	Empiece	Idem
	5. CONTRARROTACION	Idem
5.1	Ajuste rotación disco 2	Idem
	- Desde (rpm) : 0	Idem
	- Hasta (rpm) : 10	Idem
	- Aceleración (rpm/seg): 1	Idem

* La parada del mecanismo vibrador (en amplitud nula) es automática al finalizar la filmación.

Tabla 2.2. (Continuación)

PASO Nº	ENSAYO 1	ENSAYO 2
5.2	Ajuste cámara 1 - Número de imágenes : 250	Idem - Número de imágenes : 170
5.3	-	Ajuste cámara 2 - Número de imágenes : 85
5.4	Empiece	Idem
	6. ISORROTACION	Idem
6.1	Ajuste rotación disco 2 - Desde (rpm) : 10 - Hasta (rpm) : -10 - Aceleración (rpm/seg): - 1	Idem Idem Idem Idem
6.2	Ajuste cámara 1 - Número de imágenes : 250	Idem - Número de imágenes : 170
6.3	-	Ajuste cámara 2 - Número de imágenes : 85
6.4	Empiece	Idem
	7. DESALINEACION	Idem
7.1	Desplazamiento lateral disco 2 (manual) - Desde (mm) : 0 - Hasta (mm) : 1	Idem Idem Idem
7.2	Ajuste cámara 1 - Número de imágenes : 50	Idem - Número de imágenes : 40
7.3	-	Ajuste cámara 2 - Número de imágenes : 20
7.4	Empiece	Idem
7.5	Desplazamiento lateral disco 2 (manual) - Desde (mm) : 1 - Hasta (mm) : 0	Idem Idem Idem
	8. PARADA	Idem
8.1	Ajuste rotación disco 1 - Desde (rpm) : 10 - Hasta (rpm) : 0 - Aceleración (rpm/seg): -100	Idem Idem Idem Idem

Tabla 2.2. (Continuación)

PASO Nº	ENSAYO 1	ENSAYO 2
8.2	Ajuste rotación disco 2 - Desde (rpm) : - 10 - Hasta (rpm) : 0 - Aceleración (rpm/seg): 100	Idem Idem Idem Idem
8.3	Ajuste cámara 1 - Número de imágenes : 100	Idem - Número de imágenes : 80
8.4	-	Ajuste cámara 2 - Número de imágenes : 40
8.5	Empiece	Idem
9. ROTURA		
9.1	Ajuste desplazamiento disco 1 - Desde (mm) : 100.0 - Hasta (mm) : 130.0 - Velocidad (mm/seg) : .250	- - - -
9.2	Ajuste desplazamiento depósito - Desde (mm) : 84.0 - Hasta (mm) : 119.2 - Velocidad (mm/seg) : .290	Idem - Desde (mm) : 80.0 - Hasta (mm) : 105.0 - Velocidad (mm/seg) : .250
9.3	Ajuste cámara 1 - Velocidad (mm/seg) : 2 - Exposición (seg) : .25 - Diafragma : ? - Número de imágenes : 250	Idem - Velocidad : 2 - Exposición (seg) : .25 - Diafragma : ? - Número de imágenes : 200
9.4	- - - - -	Ajuste cámara 2 - Velocidad (mm/seg): 1 - Exposición (seg) : .5 - Diafragma : ? - Número de imágenes : 100
9.5	Empiece	Idem
9.6	Verificación zona rota pero todavía anclada en los discos	Idem
10. RECOGIDA		
10.1	Ajuste desplazamiento disco 1 - Desde (mm) : 130.0 - Hasta (mm) : 0.0	Idem Idem - Desde (mm) : 125.0 - Hasta (mm) : 55.0

Tabla 2.2. (Continuación)

PASO Nº	ENSAYO 1	ENSAYO 2
10.2	- Velocidad (mm/seg) : -.500 Ajuste desplazamiento depósito - Desde (mm) : 109.2 - Hasta (mm) : 0 - Velocidad (mm/seg) : - .420	- Velocidad (mm/seg) : -.500 Idem - Desde (mm) : 105.0 - Hasta (mm) : 35.0 - Velocidad (mm/seg) : - .500
10.3	Ajuste cámara 1 - Número de imágenes : 550	Idem - Número de imágenes : 300
10.4	-	Ajuste cámara 2 - Número de imágenes : 150
10.5	Empiece	Idem
10.6	-	Ajuste desplazamiento disco 1 - Desde (mm) : 55.0 - Hasta (mm) : 0.0 - Velocidad (mm/seg) : - .500
10.7	-	Ajuste desplazamiento depósito - Desde (mm) : 35.0 - Hasta (mm) : 0.0 - Velocidad (mm/seg) : - .318
10.8	-	Empiece
11.1	11. LIMPIEZA Ajuste desplazamiento disco 1 - Desde (mm) : 0.0 - Hasta (mm) : 130.0 - Velocidad (mm/seg) : .999	Idem Idem Idem Idem Idem
11.2	Ajuste desplazamiento depósito - Desde (mm) : 0.0 - Hasta (mm) : 130.0 - Velocidad (mm/seg) : .999	Idem Idem Idem Idem
11.3	Empiece	Idem
11.4	Vaciado manual conducto de inyección	Idem
11.5	Desconexión de la red	Idem
11.6	Extracción del módulo del armario	Idem
11.7	Apertura de la cámara de ensayos	Idem
11.8	Desmontaje del depósito DMS-5-T	Desmontaje del depósito DMS-1000-T
11.9	Desmontaje de los discos de 40 mm	Desmontaje de los discos de 60 mm

Tabla 2.2. (Continuación)

PASO Nº	ENSAYO 1	ENSAYO 2
11.10	Vaciado de la cámara 1	Idem
11.11	-	Vaciado de la cámara 2
11.12	Limpieza general	Idem
11.13	Verificación final	Idem

2.2. ESTUDIO DE UN SIMULADOR ELECTRONICO.

Introducción.

Es indudable el gran valor que los simuladores de vuelo - tienen para el entrenamiento de pilotos, ahorrando costosas y arriesgadas pruebas. En general, la gama de simulación puede ir desde la simple maqueta que se construye a la vez que surge la idea, hasta los sofisticados simuladores astronáuticos, que necesitan años para su desarrollo y construcción.

En nuestro caso de columnas líquidas flotantes, la casa - FIAT, que desarrolla el aparato experimental FPM ha construido varias maquetas del mismo e incluso dispone ya de modelos reales con plena maniobrabilidad que están sirviendo actualmente para el entrenamiento de los astronautas especialistas que llevarán a cabo la experimentación a bordo del Spacelab.

Sin embargo, el contacto de los especialistas con el FPM puede familiarizarlos únicamente con los mandos, los tiempos, el aspecto electromecánico del aparato, etc., faltando lo principal: el líquido. En la Tierra no se puede experimentar con el líquido entre las placas, como se hará en el Spacelab, porque la gravedad rompería la columna y derramaría el líquido. Para la simulación en Tierra con líquidos podrían sugerirse varios procedimientos:

- 1) Usar una película jabonosa llena de aire que uniera los bordes de los discos, para simular la superficie libre; este procedimiento es muy poco fiable debido a las grandes dimensiones necesarias, lo que dificulta la formación y manejo de la película de jabón.

- 2) Inmersión de la zona en otro líquido inmiscible y de la misma densidad. Este es el procedimiento que más posibilidades ofrece pues permite ensayar todo el proceso desde el llenado hasta la

rotura de la columna. Sin embargo, su incorporación al FPM en su estado actual es prácticamente imposible por las modificaciones que requeriría. De todos modos esta simulación sería cualitativa, ya que el comportamiento del líquido a ensayar estaría muy influenciado por el líquido del baño. En resumen, pese a sus aspectos positivos, este procedimiento no es adecuado.

3) Simulación electrónica en pantalla. Este procedimiento es completamente artificial, y consiste en reproducir gráficamente la información procesada por un ordenador según un programa de datos y ecuaciones que pueden modificarse durante el desarrollo. Pese a su sencillez aparente, en cuanto las ecuaciones son complicadas, esta complicación pasa al proceso del ordenador y el cálculo numérico introduce más problemas de los que puede resolver. Una solución es limitar el número de parámetros a simular. En este sentido, si se trata únicamente de reproducir la sección meridiana de la zona líquida flotante axilsimétrica, el problema resulta elemental, y, pese a sus limitaciones, puede proporcionar una valiosísima ayuda para el entrenamiento de los astronautas; de esta manera, conociendo el especialista qué es lo previsto que pase, podrá reconocer a la hora de la verdad qué es lo imprevisto y actuar en consecuencia.

Anteriormente, dentro del programa de investigaciones teóricas del Lamf-ETSIA se obtuvieron unas expresiones analíticas relativamente sencillas para las formas axilsimétricas de la superficie libre de una zona líquida flotante en ingravidez. El problema ahora sería diseñar un programa de representación gráfica en el que, en función de las actuaciones de un operador sobre los mandos (esta etapa puede simularse por completo haciendo que sean las señales directas de los mandos reales del FPM la entrada al ordenador), se obtu-

viese en pantalla un dibujo esquemático de la zona tal como el representado en la Fig. 2.2.

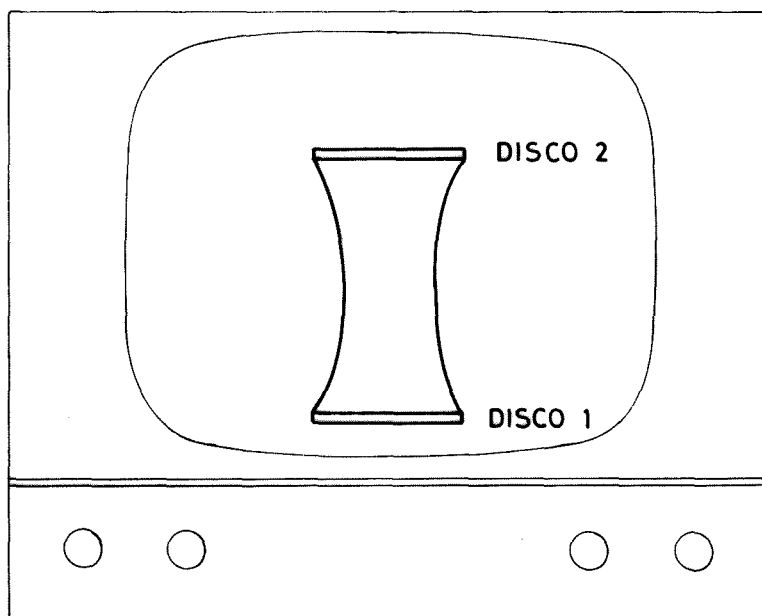


Fig. 2.2. Esquema de la representación gráfica en pantalla: disco 2 fijo, disco 1 móvil (arriba-abajo) según control de desplazamiento, perfil del líquido variable según la esbeltez de la zona y el volumen de líquido contenido.

Programa del simulador

Es difícil concretar sobre el equipo que sería necesario añadir al FPM para completar el simulador, pero el programa lógico puede ya ser definido puesto que se dispone de las ecuaciones pertinentes y se conoce su comportamiento numérico; la Fig. 2.3 muestra un esquema lógico de funcionamiento del simulador.

El problema parece sencillo, pero si se quisiera procesar la solución exacta (que da la forma de la superficie externa en función de integrales elípticas implícitas) para cada forma, el tiempo de cálculo sería excesivamente largo, imposibilitando la presentación en pantalla en tiempo real, por lo que será necesario trabajar

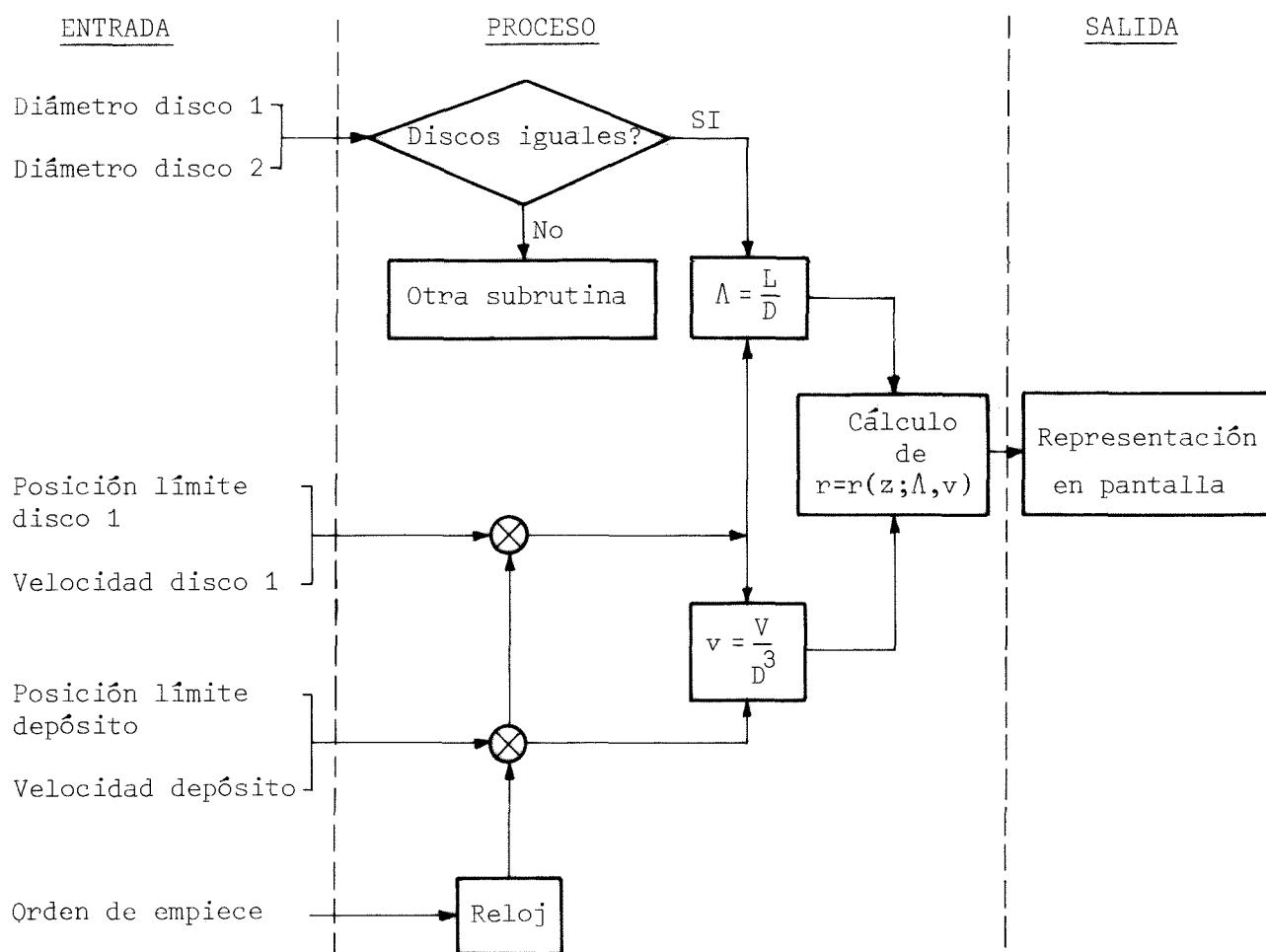


Fig. 2.3. Esquema lógico de funcionamiento del simulador de las sucesivas formas de equilibrio de la zona líquida flotante.

con fórmulas aproximadas. Por ejemplo, para el perfil de la zona se puede tomar

$$y = \frac{1}{2} \arccos \left[\cos \Lambda \left[1 - \frac{2-4x}{1-\frac{4v}{\pi\Lambda}} \left(1 - \frac{\sin \Lambda}{\Lambda \cos \Lambda} \right) \right] \right]$$

siendo $\Lambda = L/D$, $v = V/D^3$ y los ejes x e y puestos de forma que y coincide con el eje de revolución y x está en el plano medio entre los discos.

3. PRESENTACION DE DATOS

3. PRESENTACION DE DATOS

Como se muestra en la Fig 3.1, el proyecto general de las investigaciones sobre el comportamiento de las zonas líquidas flotantes, consta de dos procesos paralelos: uno de investigación teórica de la estabilidad y la hidrodinámica interna del líquido que se encuentra ya muy avanzado, habiéndose obtenido con ello una idea del comportamiento de la zona, y otro de investigación experimental que se encuentra actualmente en fase de desarrollo y que proporcionará información del comportamiento real de las zonas líquidas. La comparación de los resultados procedentes de ambos procesos permiti

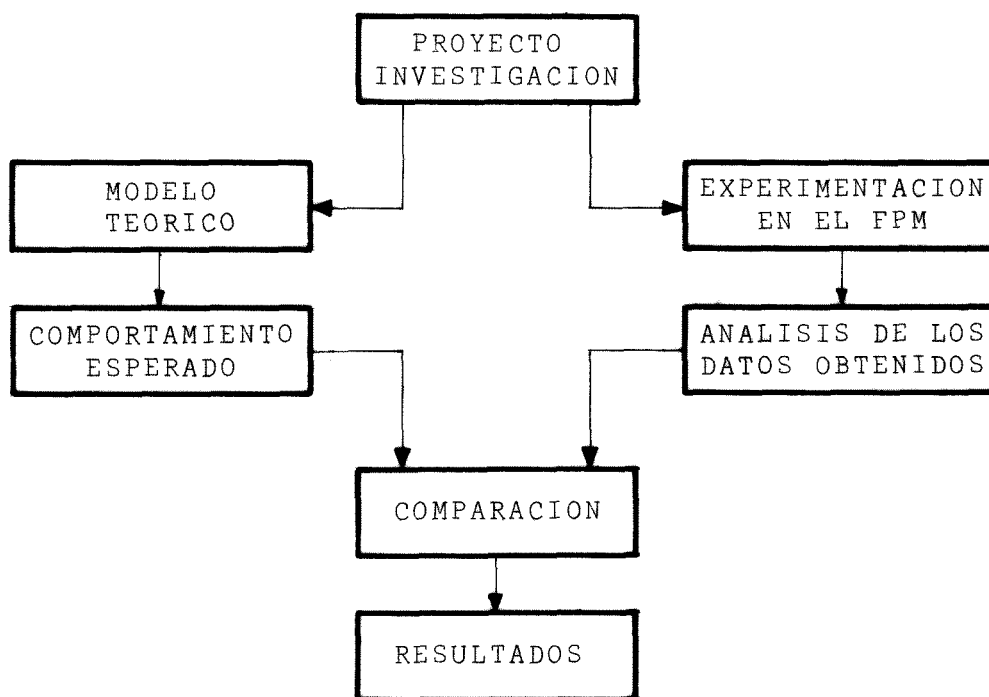


Fig 3.1. Proyecto general de las investigaciones sobre el comportamiento de las zonas flotantes.

rá obtener unas conclusiones definitivas sobre ciertas características (estabilidad, campo de velocidades, posición de las capas de cortadura, forma externa y proceso de rotura de las mismas, etc.)

cuyo conocimiento será muy beneficioso para una gran cantidad de aplicaciones ya previstas.

El proceso de investigación experimental consta de dos fases, una de obtención de datos, realizando una serie de experimentos en el FPM, y otra de análisis de los datos obtenidos.

Para dar una visión de conjunto, y comprender mejor las limitaciones del sistema de obtención de datos, se va a empezar su estudio con una descripción crítica del equipo específico utilizado en la toma de imágenes, añadiendo además el sistema de captación y registro de parámetros de funcionamiento (posiciones, velocidades, temperaturas, etc.). En el apartado siguiente se hará un análisis de los diferentes procedimientos de tratamiento de las imágenes e información general obtenida durante la experimentación en el Space-lab.

3.1. IMAGENES

Para la obtención de las fotografías se ha diseñado un sistema de visualización que tiene que cumplir los siguientes requisitos:

- Visualizar la forma de la superficie libre del fluido con la mayor precisión posible.
- Visualizar el movimiento fluido en el interior de la columna líquida con la más completa determinación de las tres componentes de la velocidad.

Esto exige el empleo de dos sistemas de iluminación diferentes:

- Un sistema de iluminación de fondo, para visualizar la forma exterior mediante transparencia (y el movimiento

del fluido en planos perpendiculares al eje de rotación por reflexión de la luz en los trazadores).

- Un sistema de iluminación del plano meridiano, para visualizar el movimiento en él (ambos sistemas de iluminación son perpendiculares entre sí).

Se utilizará la misma lámpara para ambos sistemas, con objeto de reducir la potencia absorbida, el peso y el calentamiento de la cámara de ensayos. Para registrar las imágenes formadas se dispone de dos sistemas de filmación:

- Un sistema perpendicular al plano meridiano iluminado, para detectar la forma exterior de la zona y la velocidad del fluido en el interior (en el plano meridiano).
- Un sistema situado según el eje de rotación, para registrar las velocidades en planos perpendiculares a dicho eje.

Para visualizar la velocidad del fluido se utilizarán trazadores sólidos, compensados hidrostáticamente con el fluido de prueba. Debido al tamaño reducido de éstos, el sistema de iluminación debe tener una gran eficiencia. La Fig 3.2 presenta un esquema simplificado del sistema de visualización.

3.1.1. Lámpara

Se empleará una sola lámpara para los dos sistemas de iluminación, con el fin de reducir la potencia necesaria, el peso y el calentamiento de la cámara de ensayos. Se ha elegido una lámpara Phillips-7809 conforme a los siguientes criterios:

- Fuente de alimentación eléctrica más simple y gran seguridad por ser una lámpara incandescente.

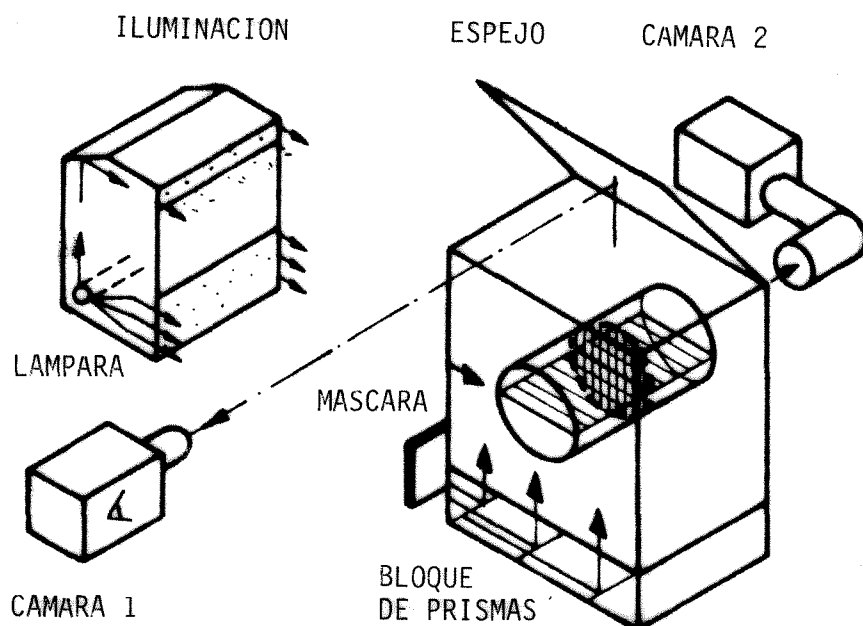


Fig 3.2. Esquema simplificado del sistema de visualización.

- Filamento pequeño y compacto, del tipo usado en las lámparas de proyección.

Esta lámpara, que se muestra en la Fig 3.3, tiene las siguientes características:

Tamaño del filamento ...:	5x2 mm.
Potencia	100 W.
Voltaje	24 V.
Flujo luminoso	2000 Lumen
Vida media	1000 horas

La lámpara irá provista de un circuito eléctrico que mantiene constante la corriente y la protege de subidas repentinas y cortocircuitos.

La temperatura de emisión es de unos 3000 K aproximadamente, siendo la distribución espectral a esta temperatura la que se

muestra en la Fig 3.4.

El calor transmitido a la cámara de ensayos por la lámpara se evacuará por medio de una corriente de aire al inicio de cada secuencia, con el fin de no distorsionar los experimentos.

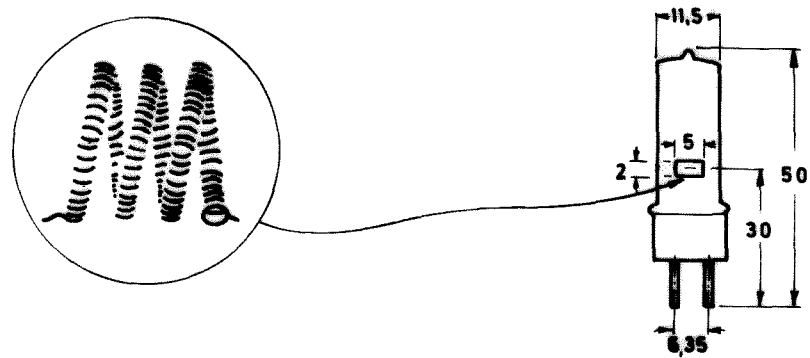


Fig 3.3. Lámpara usada para el sistema de iluminación (cotas en mm.).

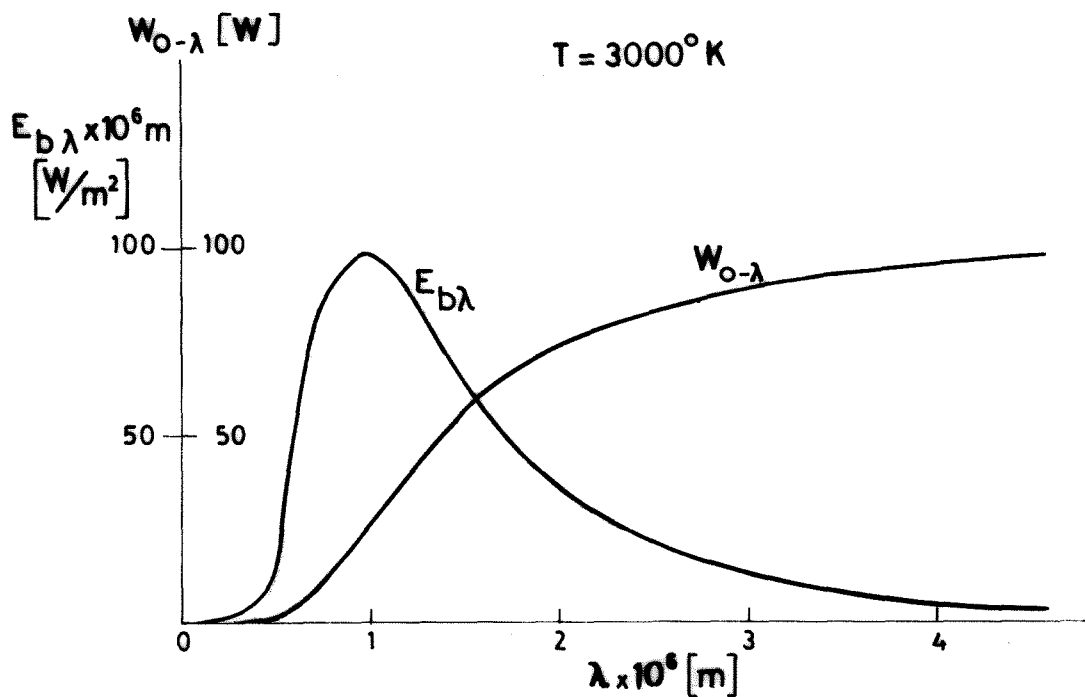


Fig 3.4. Distribución espectral de emisión de la lámpara.

La energía visible emitida es, aproximadamente, el 20-22% del total.

La cámara de ensayos tendrá una segunda lámpara de 24 V., 10 W., para iluminar el campo de trabajo cuando no esté en funcionamiento la lámpara de filmación.

3.1.2. Distribución de luz entre los sistemas de iluminación

Por diversas razones, el sistema de iluminación de fondo necesitaba recibir de la lámpara la mayor cantidad de luz posible, por lo que se ha adoptado la solución de orientarla en este sentido (en la dirección de mayor capacidad de iluminación de ésta, que es la de mayor superficie de filamento) situando el eje de la lámpara paralelo al eje de rotación, y dotarle de un condensador de mayor apertura.

Con esta disposición la luz emitida hacia este sistema es 2'5 veces mayor que la emitida hacia el de iluminación del plano meridiano.

Las características del conjunto, consideradas en la valoración anterior, se resumen en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Características de los sistemas de iluminación.

Características	Iluminación Plano Meridiano	Iluminación de fondo
Superficie iluminada (cm ²)	13×1=13	13×14=182
Transparencia	.82	.24
Relación de apertura de las lentes	f/2	f/4

Teniendo en cuenta que la eficiencia de la iluminación de fondo es más pequeña todavía, debido a la baja eficiencia de la caja de prismas y que las lentes del sistema de visualización axial que usan la luz proporcionada por este sistema tienen una apertura más pequeña para una amplitud de campo mayor, la luz reunida por las lentes del plano meridiano es, aproximadamente, 200 veces mayor que la de las lentes de visualización axial, lo que justifica la elección expuesta en líneas anteriores.

3.1.3. Sistema de iluminación del plano meridiano

La configuración de este sistema de iluminación puede observarse en la figura 3.2 (o en la 1.3, donde se detallan sus componentes). De esta manera se consigue crear una intensa iluminación de un plano meridiano del fluido.

El espesor del plano luminoso es mínimo en el eje de rotación (6 mm) y máximo en la parte del contorno (12 mm. aproximadamente).

Se ha dispuesto un espejo que filtra los rayos infrarrojos para evitar que la cámara de ensayos se caliente.

Las características de transmisión de este espejo pueden verse en la Fig 3.5.

3.1.4. Sistema de iluminación de fondo

Este sistema es el encargado de proporcionar la iluminación necesaria para permitir la visualización de la forma de la superficie libre del líquido, y/o de los trazadores que se encuentran en un plano perpendicular al eje de rotación, pudiéndose seleccionar cada uno de ellos mediante el desplazamiento de un filtro. La

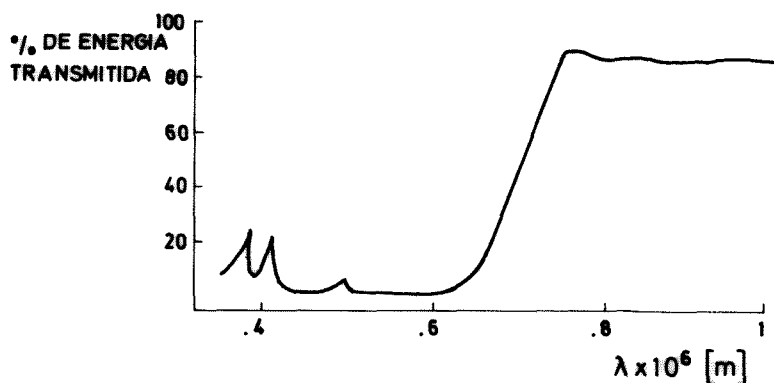


Fig 3.5. Características de transmisión del filtro de infrarrojos del sistema de iluminación del plano meridiano.

configuración del sistema se muestra en la Fig 1.3.

Para conseguir la intensidad de luz necesaria se ha dispuesto una lente condensadora, una caja de prismas semitransparentes y una orientación del filamento de la lámpara que muestre su superficie mayor en esta dirección.

Para conseguir una iluminación uniforme, evitando la formación de sombras en las zonas próximas a las placas, se colocó un filtro de diseño especial (ver Fig 3.6) que difunde la luz envia

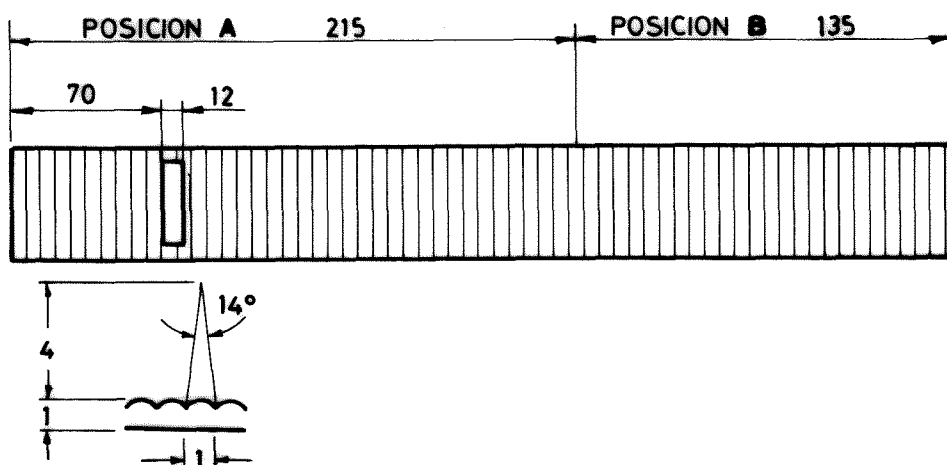


Fig 3.6. Configuración del filtro difusor con ranura deslizante. (Cotas en mm).

da con un ángulo $\theta \approx 7^\circ$. Este filtro es deslizante, con dos posiciones de colocación. En la posición A, mediante una ranura de 12 mm. ilumina un plano perpendicular al eje de rotación (puede elegirse su situación a lo largo de la columna líquida). En la posición B, proporciona una iluminación difusa uniforme para visualizar el contorno de la superficie libre de la zona. Como el sistema anterior, dispone de un filtro de infrarrojos cuyas características de transmisión se muestran en la Fig 3.7.

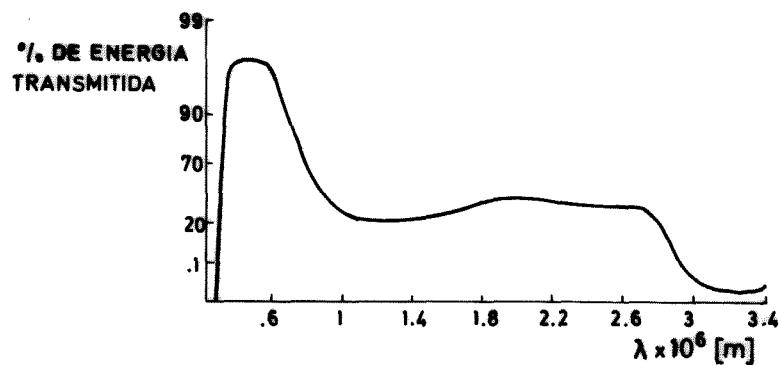


Fig 3.7. Características de transmisión del filtro de infrarrojos del sistema de iluminación de fondo.

En este sistema habrá que introducir una serie de modificaciones para resolver satisfactoriamente el problema de conocer con precisión la situación de los bordes, cuya determinación es compleja debido al comportamiento de los rayos luminosos al atravesar esta zona. El problema sigue en estudio actualmente.

3.1.5. Sistema de captación de imagen

Para recoger las imágenes formadas por los sistemas de iluminación se han diseñado dos sistemas de captación, uno según el eje de rotación y otro según el plano meridiano iluminado. El

objeto del primero es recoger las imágenes formadas en el plano perpendicular al eje de rotación iluminado, y el del segundo las formadas en el plano meridiano iluminado (forma externa de la zona, trayectorias de los trazadores). Debido a los diferentes requisitos que deben cumplir cada uno de ellos, su configuración corresponde a diseños muy diferentes, como se verá a continuación.

•Sistema de captación según el eje de rotación.

La captación de las imágenes formadas en el plano normal al eje de rotación requiere la observación de las mismas según el eje de rotación a través de la zona central transparente de uno de los discos. Debido a diversos factores, el sistema presenta una serie de problemas:

- Espacio limitado.
- Desplazamiento axial del disco de observación, causado por la vibración de ± 0.5 mm.
- Desplazamiento lateral de dicho disco de ± 2 mm.
- Bajo nivel de iluminación.
- Gran profundidad de campo.
- Extenso campo visual.

Para resolver estos problemas, aunque en un principio se pensó en la utilización de fibras ópticas, al final se ha adoptado como solución un sistema óptico clásico, como se muestra en la Fig 3.2 y con detalle en la Fig 3.8, que presenta las siguientes ventajas frente a las fibras ópticas:

- Mejor luminosidad (4 a 8 veces).
- Mejor definición.
- Mayor ángulo visual.

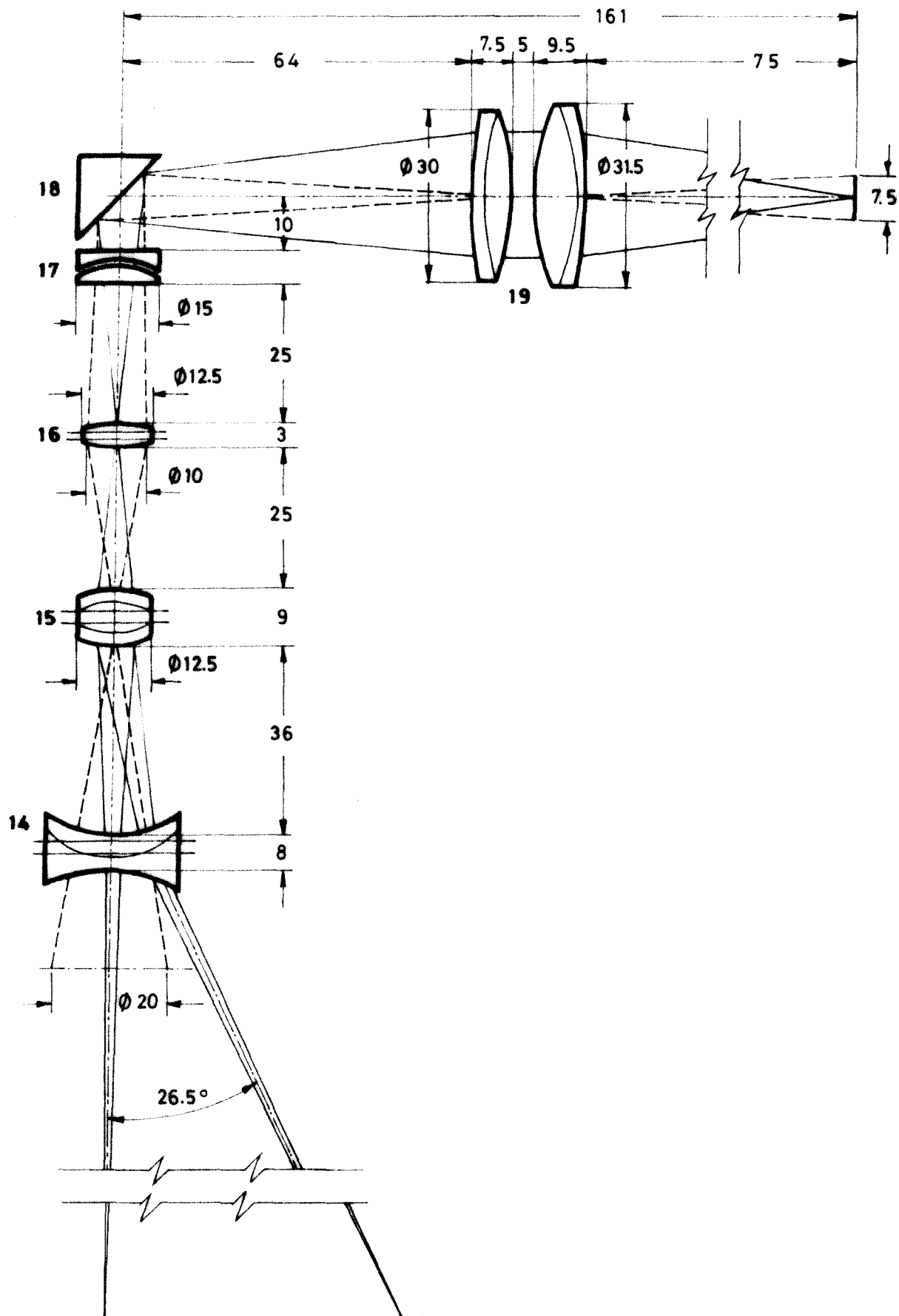


Fig 3.8. Sistema óptico según el eje de rotación. (Cotas en mm).

- Posibilidad de enfocar el sistema.
- Menor peso.

La presencia de líquido en el área de visión afecta a las distancias y a los ángulos visuales. En la Fig 3.9 se muestra un diagrama del campo visual efectivo. El ángulo de visión experimen-

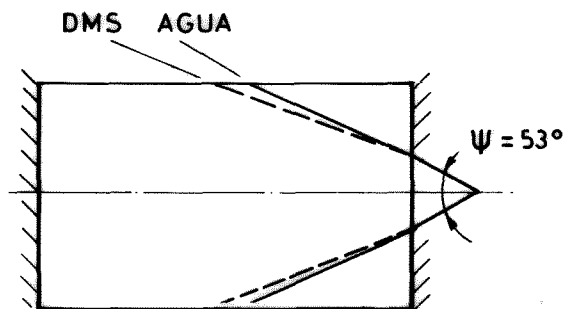


Fig 3.9. Diagrama del campo visual efectivo.

ta una variación debida a la presencia de líquido. Si el ángulo de visión en el aire es ψ , en presencia de líquido será ψ^* :

$$\psi^* = 2 \arcsen \left| \frac{\sin(\psi/2)}{n} \right| .$$

En el caso de la distancia de enfoque, si L es el valor de la misma en el aire, en el seno del líquido será L^* :

$$L^* = L/n ,$$

donde n es el índice de refracción. Las restricciones impuestas por el diámetro del tubo en que se aloja el sistema óptico, hacen que se fije $\psi=53^\circ$.

La distancia de enfoque está limitada por la distancia focal:

$$60 \text{ mm} \leq L \leq 130 \text{ mm}$$

La variación en el ángulo de visión y la distancia de enfoque para los fluidos utilizados vienen dados en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2

Valores del ángulo de visión, ψ^* , y la distancia de enfoque, L , en función del índice de refracción, n .

Fluido	n	ψ^* (°)	L_{min}^* (mm)	L_{max}^* (mm)
Aire	1	53	60	130
Agua	1.333	39.1	45	97.7
Dimetilsilicona 5 Cs	1.397	37	42.9	93
Dimetilsilicona 1000 Cs	1.403	37.07	42.7	92.6

La resolución en el espacio del objeto correspondiente a un objeto situado fuera del plano enfocado es:

$$D_{conf_{ogg}} \approx D_{obb} \cdot \left| \frac{q}{q_0} - 1 \right| ,$$

donde

D_{obb} : diámetro del haz que atraviesa la lente = 2 mm

q : posición del objeto

q_0 : posición del plano del objeto que es enfocado.

La resolución mínima en el espacio del objeto es alrededor de .5 mm con una luminosidad muy superior a la del sistema de fibras ópticas.

La resolución teórica en el espacio del objeto debido a difracción es:

$$D_{diff_{ogg}} = 1.22 \lambda \frac{q}{D_{obb}} ,$$

ambas ecuaciones se representan en la Fig 3.10.

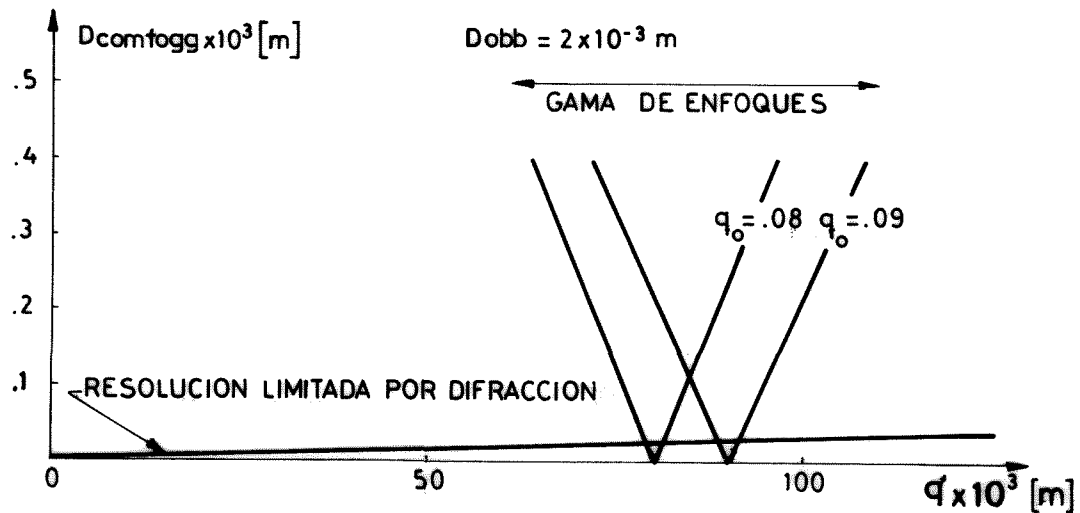


Fig 3.10. Resolución en el plano del objeto del sistema de captación de imagen según el eje de rotación.

El parámetro que tiene mayor efecto en la definición del sistema es la profundidad de campo.

La cámara y todo el sistema óptico está situado en unas guías que permite desplazamientos laterales.

Las principales características de conjunto del sistema óptico son las siguientes:

Relación de escala objeto/imagen 13.5:1

Diámetro de apertura del rayo incidente 2 mm

Transparencia62

• Sistema de captación según el plano meridiano

Para poder registrar imágenes del movimiento de los trazadores en el plano meridiano y de la forma externa de la zona, se ha ideado un sistema (ver Fig 3.2) que permite realizar esto por medio de una cámara de cine que toma las imágenes a través de un espejo de dimensiones lo suficientemente amplias como para que el

operador pueda observar sin esfuerzo y con comodidad los fenómenos que ocurren y realizar las manipulaciones precisas con mayor facilidad y precisión.

Hay que tener en cuenta que la visualización de la forma exterior de la zona es una de las partes más importantes de la experimentación, por lo que debe facilitarse su realización por todos los medios posibles; así, tanto si interesa conocer el campo de velocidades, como si no, siempre se registrará la forma externa.

3.1.6. Cámaras de cine

El módulo de ensayos estará provisto de dos cámaras de cine de 16 mm. Estas son preferibles a las cámaras fotográficas por tener una frecuencia de disparo mayor, por poder obtener un mayor número de fotografías y por un bajo peso de conjunto. A pesar del pequeño tamaño de los negativos, la capacidad de resolución utilizando el tipo adecuado de película, es aceptable.

Se ha elegido la cámara VINTEN MK3, que es la que mejor se adapta, de las existentes en el mercado, a los actuales requisitos de experimentación. Sus características principales son:

- Amplia gama de tiempos de exposición (incluyendo los prolongados).
- Consumo: 15 W (a 28 V.).
- Ligera: 1.2 kg., incluyendo el cartucho de película.
- Sistema de carga por cartuchos, impermeables a la luz, que permite cambiar rápidamente el tipo de película entre experimentos.
- Carga: 15 m. de película.

- Funcionamiento semiautomático (controlado electrónicamente).

El formato del negativo impresionado es de 10.41 mm × 7.46 mm, y para que el campo de ensayos lo llene completamente, se requiere una lente de distancia focal de 25 a 28 mm.

3.1.7. Trazadores

Para la visualización del movimiento del fluido tanto en el plano meridiano como en el perpendicular al eje de rotación, se emplearán trazadores sólidos. Para la elección del trazador apropiado se han llevado a cabo pruebas con varios tipos, comparando sus características, concluyéndose que el más indicado es el tipo ECCOSPHERES FA-A fabricado por Emerson & Cuming, Inc.

Los trazadores de este tipo son pequeñas esferas huecas (.1-.3 mm de diámetro), de material cerámico, cuyas principales características se muestran en la Tabla 3.3 de la página siguiente.

Los requisitos considerados en la elección son:

- Tamaño: lo bastante pequeño para que perturbe el movimiento del fluido lo menos posible, y lo bastante grande para que sea visible y tenga buena reflectividad.

- Pasividad: no reaccionar con el líquido y no absorberlo.

- Cohesión: pequeña o nula para evitar aglomeraciones.

- Flotabilidad: neutra; para que esté hidrostáticamente compensado con el líquido y permitir la visualización del movimiento convectivo.

- Adherencia: pequeña o nula para que no se pegue a las paredes.

Tabla 3.3
Características de los trazadores

Composición	Cerámica
Color	Tostado
Densidad aparente (kg.m^{-3})	400
Densidad verdadera (kg.m^{-3})	600
Factor de empaquetamiento	.620
Espesor promedio de la pared (m.10^6)	3.5
Temperatura de ablandamiento ($^{\circ}\text{C}$)	982
Conductividad térmica ($\text{J.s}^{-1}\text{m}^{-1}.^{\circ}\text{C}^{-1}$)	.12883
% de volumen deteriorado a la presión de $1.1 \times 10^7 \text{ Pa}$	17.0
Distribución de tamaño de los trazadores	
Intervalo de tamaño ($\text{m} \times 10^6$)	% en peso
>175	5
149-175	11
125-149	19
100-125	24
62-100	35
44-62	4
<44	2

El trazador seleccionado presenta las mejores características en todos estos aspectos, aunque tiene una pequeña tendencia a depositarse en las paredes. En cuanto a la flotabilidad, como contiene fracciones de diferentes densidades, ha de hacerse una selección de aquélla que tenga la misma que el líquido. Esto se hace por un sencillo procedimiento, empleando la segregación natural en sucesivas etapas: en agua, en alcohol, y en la dimetilsilicona usada, tal como se muestra en la Fig 3.11. La duración de las sucesivas segregaciones se elige teniendo en cuenta la viscosidad del líquido (la viscosidad retarda la segregación).

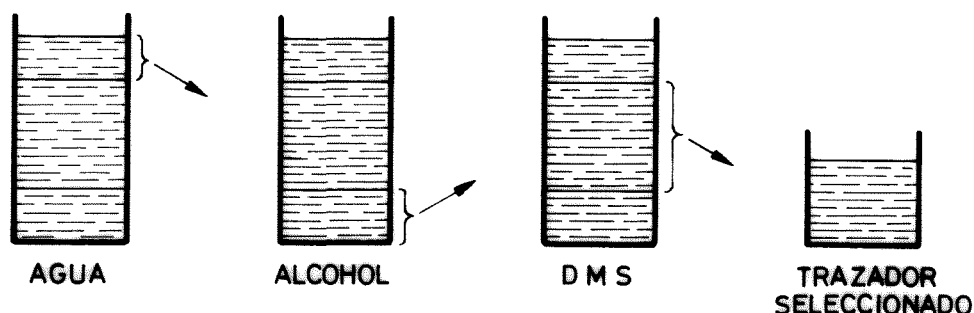


Fig 3.11. Procedimiento de selección de trazadores de densidad elegida.

Se han probado los trazadores con y sin recubrimiento metálico (de plata). Todavía no se han obtenido resultados concluyentes sobre la metalización, aunque debido a lo complicado del procedimiento de metalización de esferas tan pequeñas, no parece que vaya a ser utilizado.

3.1.8. Películas

Para un mejor resultado de los experimentos, se podrán usar tres tipos diferentes de películas:

a) En la cámara para el sistema axial, una película de máxima sensibilidad, con las siguientes especificaciones:

- Sensibilidad: 8000 ASA.
- Resolución: 50 líneas/mm.
- Sensibilidad al color: lámpara incandescente.
- Tipo de imagen: líneas luminosas delgadas en un campo oscuro.

El tipo de película elegido es: KODAK RECORDING 2745.

b) Para la visualización de la forma externa se requiere una película de máxima capacidad de resolución, con las siguientes

especificaciones:

- Resolución: 500-200 líneas/mm.
- Sensibilidad: .01 julios/m².
- Sensibilidad al color: luz de color con ancho de banda de .1 μ m.
- Tipo de imagen: alto contraste.
- Estabilidad dimensional: $\Delta L/L < 10^{-4}$
- Coeficiente de dilatación: $\alpha < 5 \times 10^{-5} \text{ } (^{\circ}\text{C})^{-1}$.

Hay dos tipos elegidos para esta aplicación:

- AGFA GEVAERT COPEX PAN, microfilm con 500 líneas/mm de capacidad de resolución y una sensibilidad estimada de .3 julios/m².
- AGFA GEVAERT HOLOTEST 10E75, película holográfica con una capacidad de resolución de 1000 a 2000 líneas/mm y una sensibilidad de .45 julios/m².

c) El movimiento interno requiere una película con buena capacidad de resolución y alto contraste, para obtener un contorno exterior en gris y trazadores en blanco. Se ilumina simultáneamente con la luz de fondo y el plano meridiano. La película debería satisfacer las siguientes especificaciones:

- Resolución: 100-200 líneas mm.
- Sensibilidad: 60-100 ASA.
- Sensibilidad al color: lámpara incandescente.

Dentro de la gama de películas comerciales, las que más se aproximan a estas especificaciones son:

- KODAK PLUS X standard, 22 DIN, 125 ASA; película pancromática.

- AGFA COPEX PAN, microfilm rápido de alto contraste,
con una resolución de 300 líneas/mm.

3.1.9. Fotografías

A partir de las películas impresionadas se obtendrán una serie de fotografías similares a la de la Fig 3.12, que contiene unas líneas luminosas delgadas, que representan el movimiento de los trazadores. El contorno de la superficie de la zona se apreciará por un cambio brusco de la intensidad luminosa.

Estas serán la base de los pasos siguientes que comprenden la selección y extracción de los datos correspondientes (situación de los trazadores, situación de los puntos del contorno, etc.) y posterior tratamiento y análisis de la imagen por medios manuales y automáticos para determinar las tres componentes de la velocidad en las partículas del interior del fluido así como la forma de la superficie externa del líquido.

3.2. DATOS DE FUNCIONAMIENTO

La información del valor de los parámetros de funcionamiento (posiciones, velocidades, frecuencias, potencial eléctrico, temperaturas) es una componente muy importante de la información total; estos datos servirán para verificar la correcta realización de los sucesivos experimentos y valorar las fotografías tomadas en las diversas etapas de la experimentación.

Para recoger estos datos, generados durante la realización de los experimentos en el FPM, se ha diseñado un sistema de adquisición de datos de acuerdo con las características de la in-



Fig 3.12. Fotografía típica del movimiento de los trazadores.

formación que se trata de tomar y del tipo de experimentos que se efectuarán y que determinan los parámetros principales de diseño (cantidad de información y rapidez de la secuencia a que debe realizarse la adquisición de dicha información).

En la descripción del proceso de adquisición se considerarán por una parte las señales que se producen en el FPM (que contienen la información de los parámetros de funcionamiento) y por otra el funcionamiento lógico del sistema de adquisición.

3.2.1. Señales

En el FPM existen una serie de sensores (de temperatura, posición, etc.) que generan unas señales eléctricas, las cuales se envían a la Consola Central (CC) del MSDR, donde estarán disponibles para información del operador y envío directo a tierra (para su almacenamiento).

Por las limitaciones existentes, la presentación de estas señales está organizada de la siguiente forma: un conjunto de ocho indicadores binarios luminosos (lámparas) representan las ocho señales de control más necesarias, que muestran el estado de funcionamiento del FPM (ver Tabla 3.4) y dos marcadores decimales de cinco dígitos en los que pueden presentarse las señales que se seleccionen, aunque, mientras no se seleccione ninguna en particular se mostrarán en los marcadores las señales de los parámetros que es necesario controlar directamente para poderlos fijar manualmente (desplazamiento lateral del disco 2, A_2 y amplitud de vibración del disco 2, A_1) y que hay que variar durante los experimentos.

Las señales pueden ser de tres tipos (ver Tabla 3.5):

Tabla 3.4

Características de las señales de funcionamiento que se presentan con lámparas en la consola central del MSDR.

Designación	Lámpara	Color	Función	Descripción
	1	Verde	Estado	Operación
	2	Rojo	Estado	Secuencia abortada
x ₁	3	Amarillo	Estado	Disco 1 girando
x ₇	4	Amarillo	Estado	Disco 1 desplazándose
x ₉	5	Amarillo	Estado	Depósito desplazándose
x ₁₁	6	Amarillo	Estado	Disco 2 vibrando
x ₁₃	7	Amarillo	Estado	Disco 2 calentándose
x ₄	8	Amarillo	Estado	Disco 2 girando

1) de aviso, que muestran el estado en que se encuentra al FPM durante los experimentos (1 bit cada una); 2) analógicas, que dan los valores de diversos parámetros (temperaturas de los termistores, velocidades, etc.), y 3) digitales, que dan los valores de la posición del disco 1, x₁₇, y del depósito, x₁₈. La razón de que los valores de todos los diversos parámetros no se envíen desde el FPM en forma digital fue la de no complicar innecesariamente el diseño inicial, pero actualmente se estima conveniente disponer de todas las señales en forma digital.

Las señales pueden desempeñar diferentes funciones dentro del sistema general de manejo de la información: almacenamiento, control automático, control manual y verificación. En condiciones normales se almacenarán todas las señales por medio del sistema de adquisición, para ser posteriormente analizadas (aunque están previstos otros modos de funcionamiento en los que se seleccionan).

Tabla 3.5. Características de las señales enviadas por el FPM a la consola central del MSDR.

DESIGNACION	DESCRIPCION	ESCALA DE MEDIDA				ESCALA DE VOLTAJES		Nº DE BITS SIGNIFICATIVOS	MUESTREO (1) (Veces/seg)	USO (2)
		MIN	MAX	PRECISION	UNIDAD	MIN	MAX			
	<u>SEÑALES DE AVISO</u>									
X ₁	Disco 1 girando							1	50	1,3
X ₂	Disco 1 en régimen							1	50	1,2
X ₃	Dirección rotación disco 1							1	50	1
X ₄	Disco 2 girando							1	50	1,3
X ₅	Disco 2 en régimen							1	50	1,2
X ₆	Dirección rotación disco 2							1	50	1
X ₇	Disco 1 desplazándose							1	50	1,3
X ₈	Disco 1 en posición							1	50	1,2
X ₉	Depósito desplazándose							1	50	1,3
X ₁₀	Depósito en posición							1	50	1,2
X ₁₁	Disco 2 vibrando							1	50	1,3
X ₁₂	Vibración disco 2 en régimen							1	50	1,2
X ₁₃	Disco 2 calentándose							1	50	1,3
X ₁₄	Temperatura disco 2 alcanzada							1	50	1,2
X ₁₅	Diferencia de potencial actuando							1	50	1,2
X ₁₆	Cámara 1 en marcha							1	50	1
X ₁₉	Impulso de disparo							1	50	?
	<u>SEÑALES ANALOGICAS</u>									
A ₁	Amplitud vibración disco 2	0.0	0.5	±1.5	um	0	5	8	50	1,2,4
A ₂	Desplazamiento lateral disco 2	0.0	2	± 5	um	0	2	8	50	1,3,4
A ₃	Difer. de potencial entre discos	-100	+100	± 1	V	-10	+10	8	50	1,2
A ₄	Temperatura del termistor 1	20	60	±0.5	°C	2	6	6	50	1,2
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
A ₁₁	Temperatura del termistor 8	20	60	±0.5	°C	2	6	6	50	1,2
A ₁₂	Velocidad rotación disco 1	0	+100	±0.1	rpm	0	10	9	50	1,2
A ₁₃	Velocidad rotación disco 2	0	+100	±0.1	rpm	0	10	9	50	1,2
A ₁₄	Frecuencia vibración disco 2	0	2	±0.002	cps	0	2	9	50	1,2
	<u>SEÑALES DIGITALES (3)</u>									
X ₁₇	Posición disco 1	0	130	±0.05	mm			11	50	1,2
X ₁₈	Posición depósito	0	130	±0.05	mm			11	50	1,2

(1) Sólo se realiza el muestreo de las señales de funcionamiento (lámparas) y las A₁, A₂ para su verificación (o en lugar de éstas últimas aquellas que se hayan seleccionado), excepto cuando hay un impulso de disparo en que se muestrean las que correspondan al modo de almacenamiento en que se opere.

(2) 1, almacenamiento; 2, control automático; 3, verificación; 4, control manual. En el Modo Normal se almacenan todas las señales cada impulso de disparo, mientras que en el Modo Selectivo sólo se almacenan las señales seleccionadas, cada cierto número de impulsos.

(3) Codificadas en BCD.

nan las señales a almacenar). Hay un conjunto de señales que se utilizan para control automático del desarrollo del experimento en el propio FPM (control de posicionado en la configuración elegida) y en el MSDR (señales de control en la secuencia del proceso de adquisición de datos). Otras señales sirven para controlar ciertos parámetros cuyo posicionado se realiza manualmente. Las señales de verificación se pueden mostrar en la CC del MSDR para, al igual que las anteriores, proporcionar al operador adecuada información del estado del FPM (FPM funcionando, secuencia abortada, rotación, calentamiento,...).

3.2.2. Sistema de adquisición de datos

La información generada durante la realización de los experimentos en el FPM se recoge mediante un sistema de adquisición de datos, cuya configuración se muestra en la Fig 3.13.

Los experimentos se realizan en el FPM bajo el control del operador, que estará en contacto con el investigador principal durante el desarrollo de éstos. El operador manipula los parámetros del FPM de acuerdo con las instrucciones del Manual de Operaciones de la misión y, en el caso de presentarse algún imprevisto, con las recomendaciones del investigador principal.

Los datos generados en el FPM pasan a través de la CC del MSDR, que los transforma a forma digital, al procesador, que los envía por el enlace de radioondas a la estación terrestre, donde son almacenados. Las películas tomadas de los experimentos, permanecen a bordo hasta el regreso a tierra del Orbiter con el Spacelab.

En el estado actual, el FPM está incluido en el MSDR, en

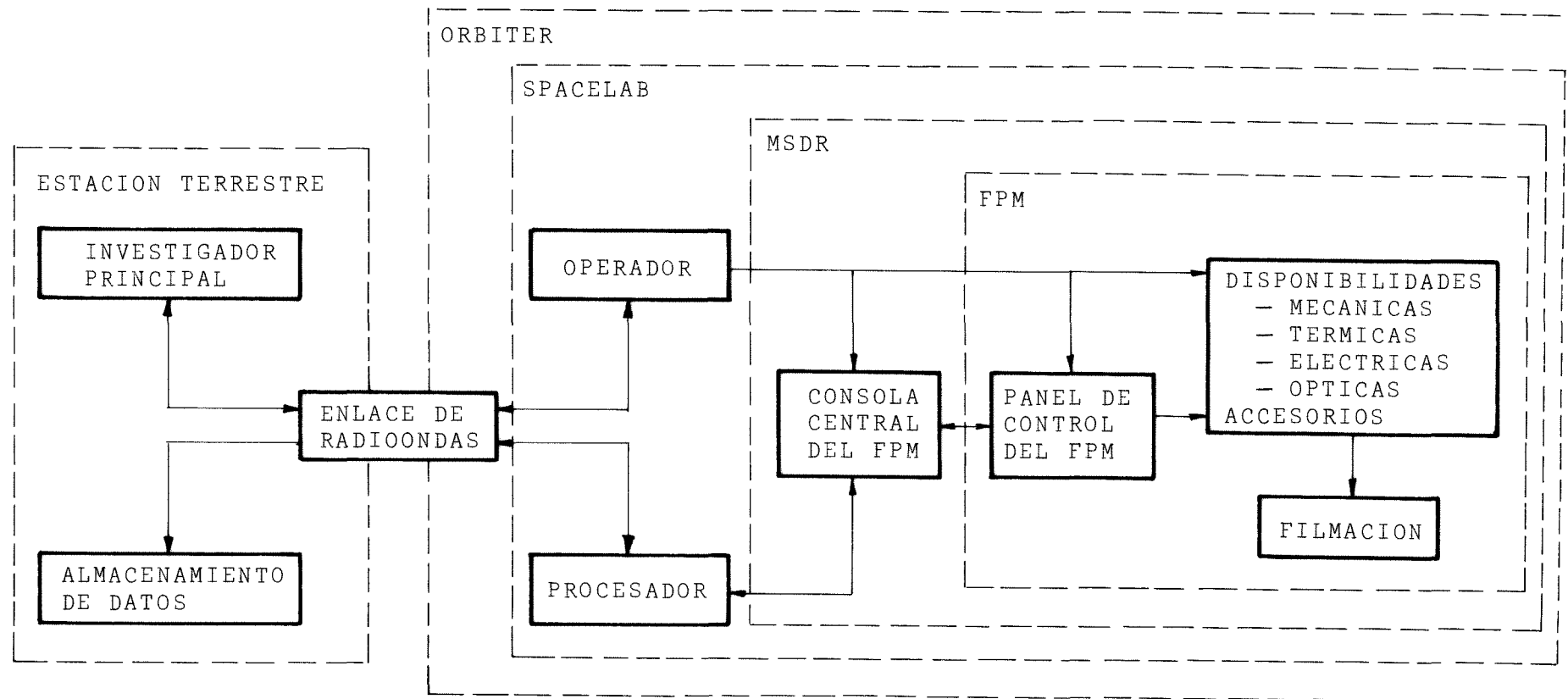


Fig 3.13. Configuración del sistema de adquisición de datos.

el que además existen otros módulos de experimentación, hornos principalmente, resultando por tanto el MS DR una solución de compromiso entre éstos, lo que limita de alguna manera las posibilidades del FPM. Debido a la importancia de este tipo de experimentación, en un futuro próximo está previsto el independizar el FPM del MS DR, incluyendo dentro de éste su propia Consola de control, con su sistema de adquisición desarrollado de acuerdo únicamente con sus propias necesidades.

En la Fig 3.14 se muestra un esquema de la transmisión de señales entre el FPM y la CC del MS DR. El FPM envía las señales de los diferentes parámetros, recibiendo de la CC el suministro de energía.

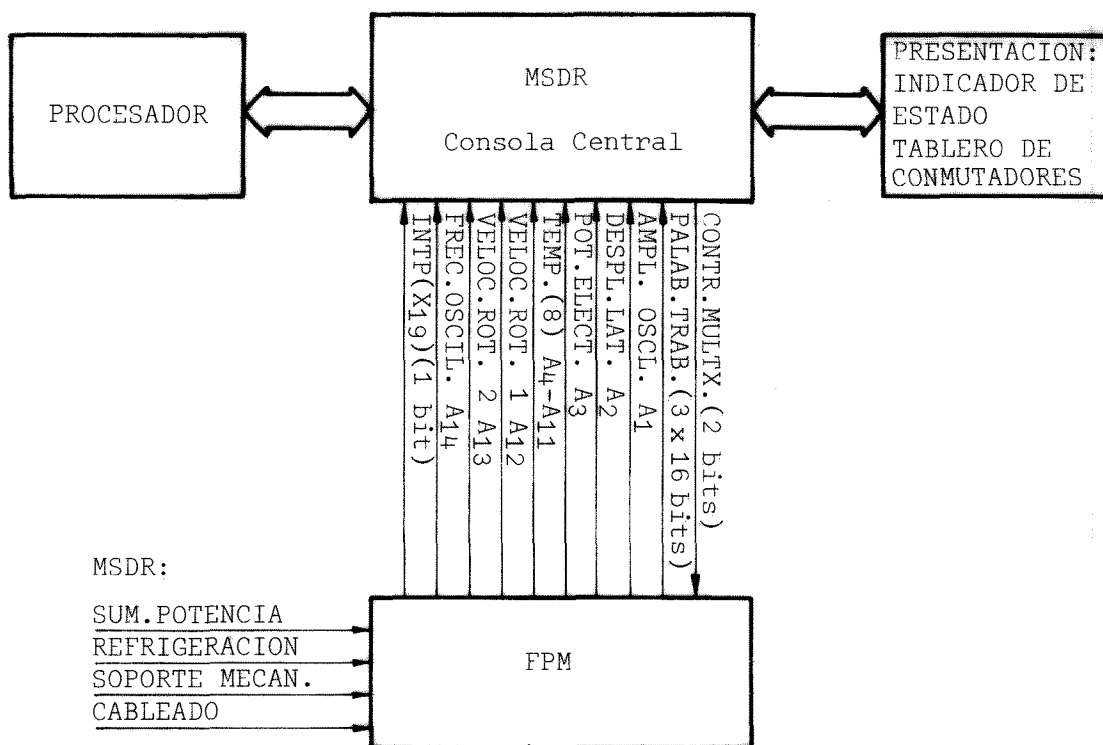
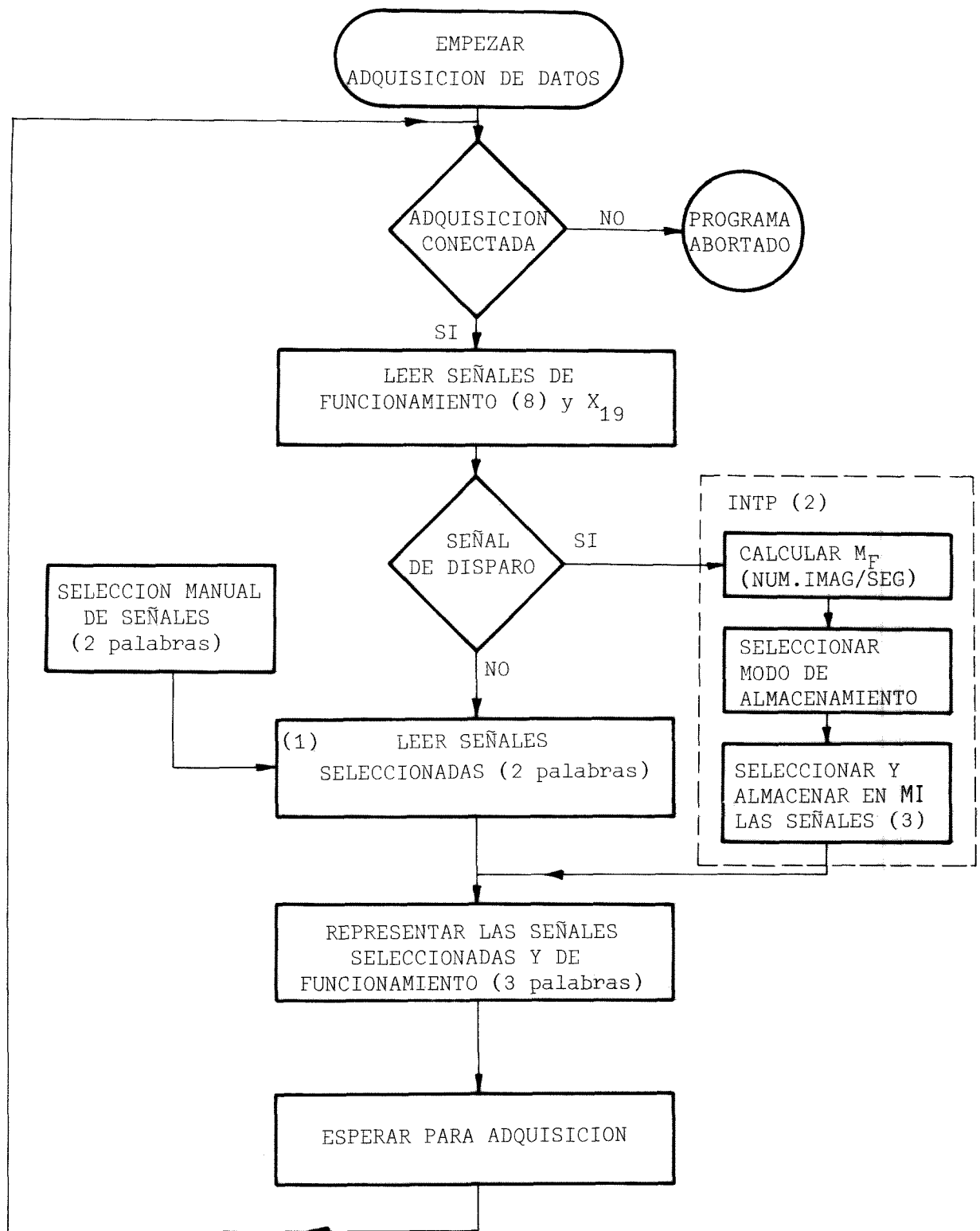


Fig 3.14. Esquema de la comunicación de señales entre el FPM y la Consola Central del MS DR.

gía eléctrica y una señal de control (2 bits) al multiplexor que selecciona la señal digital a enviar (una palabra de 16 bits que puede ser formada por x_1, x_2, \dots, x_{16} , ó x_{17} , ó x_{18}).

El diseño del programa que ha de dirigir el proceso de adquisición de datos, es una labor de suma importancia, ya que de ella depende en alto grado el correcto funcionamiento de todo el sistema. Este programa debe ser el resultado de un estudio exhaustivo en el que se tengan en cuenta los diferentes modos de funcionamiento, las operaciones a realizar, las necesidades de los experimentadores y las limitaciones impuestas al sistema. Este estudio no está hecho todavía y, debido al interés que representa para nuestro experimento, se han realizado en este Laboratorio estudios sobre el particular, exponiéndose a continuación las conclusiones obtenidas, tratando de conjugar por un lado las necesidades de la experimentación (número de datos a obtener, velocidad de adquisición, precisión, etc.) y las limitaciones de todo tipo (velocidad máxima de adquisición impuesta por el MSDR, precisión de la frecuencia suministrada, capacidad de la memoria intermedia, simplicidad de empleo, etc.), optimizando el resultado.

El proceso de adquisición se realiza en la CC de acuerdo con el programa de adquisición (ver Fig 3.15). Este consta de una secuencia principal, que deberá realizarse 50 veces por segundo, y de una secuencia secundaria (INTP), que se encarga del almacenamiento de datos en una memoria intermedia (MI), que se realizará interrumpiendo la principal cuando tenga lugar la señal de disparo de la cámara principal, sincronizándose así la toma de imágenes con la de datos, cuya frecuencia es siempre menor de 25 c.p.s.. El fun



- (1) Caso de no seleccionar ninguna se leerán A_1 y A_2
- (2) Ver Fig 3.16.
- (3) Ver Fig 3.18.

Fig 3.15. Esquema del programa de adquisición de datos.

cionamiento de la secuencia principal es el siguiente: al conectar la adquisición de datos se comprueba si el FPM está conectado y llegan sus señales a la CC; si no lo está, se ilumina la lámpara de aviso de aborto de programa, y si está conectado, entonces se lee la palabra de estado y la señal de disparo de la cámara (x_{19}). Mientras no haya señal de disparo se leen y muestran en la CC, además de las luces de funcionamiento, los dos parámetros seleccionados (mientras no se seleccione alguno en particular, los que aparecerán serán los de desplazamiento lateral y amplitud de la oscilación), y después espera hasta que empiece el ciclo de nuevo.

Cuando tenga lugar la señal de disparo, entonces se interrumpirá la secuencia principal, pasándose a la secundaria (INTP) (ver Fig 3.16). En la secuencia secundaria se selecciona automáticamente el modo de almacenamiento de acuerdo con la velocidad de filmación (M_F , número de imágenes por segundo) de las cámaras y se seleccionan las señales (según sea el modo de almacenamiento) utilizando la palabra de estado (ver Figs 3.17 y 3.18). Estas se almacenan en la MI y se vuelve a la secuencia principal.

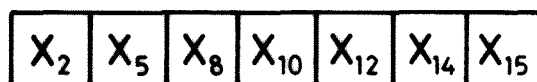
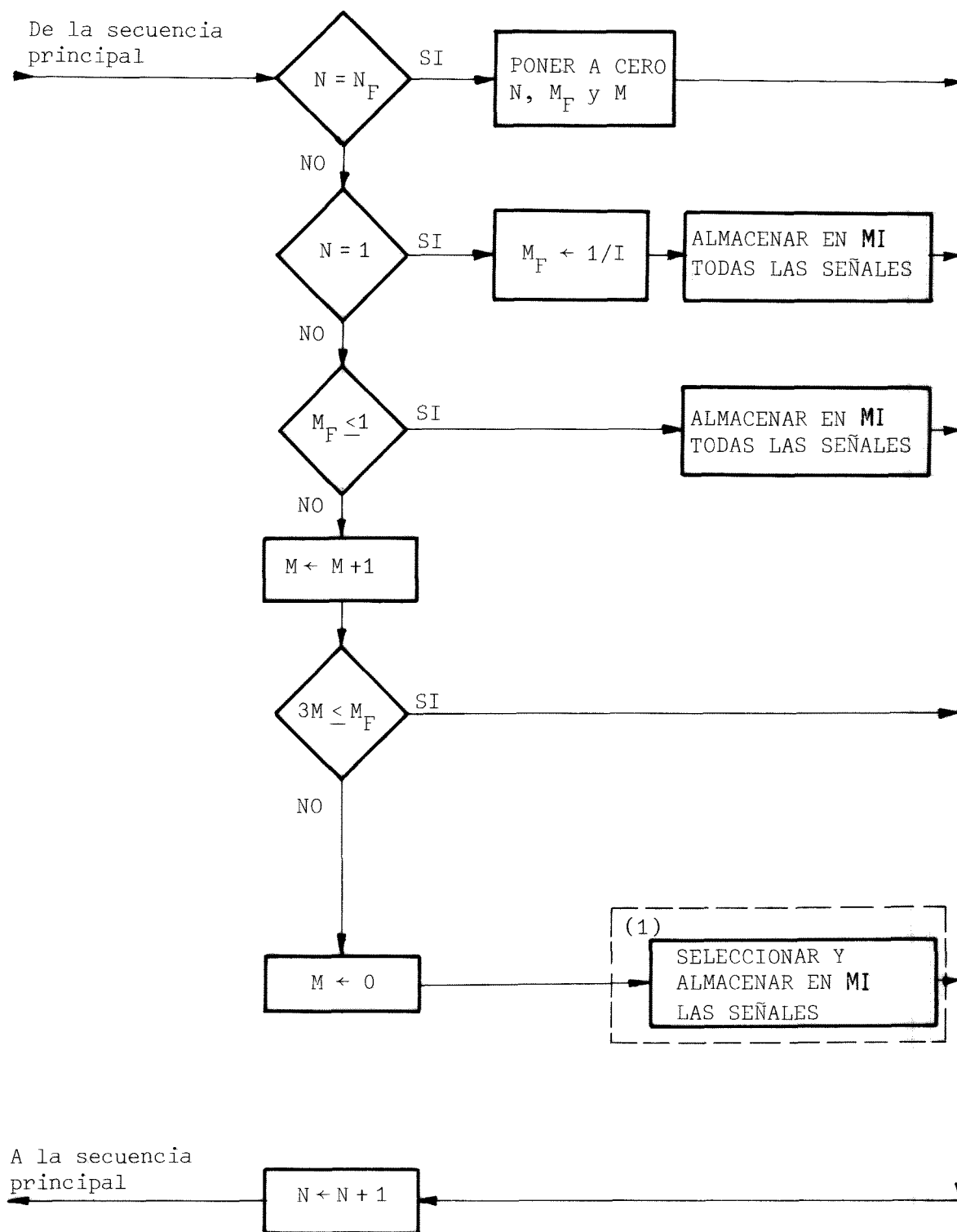


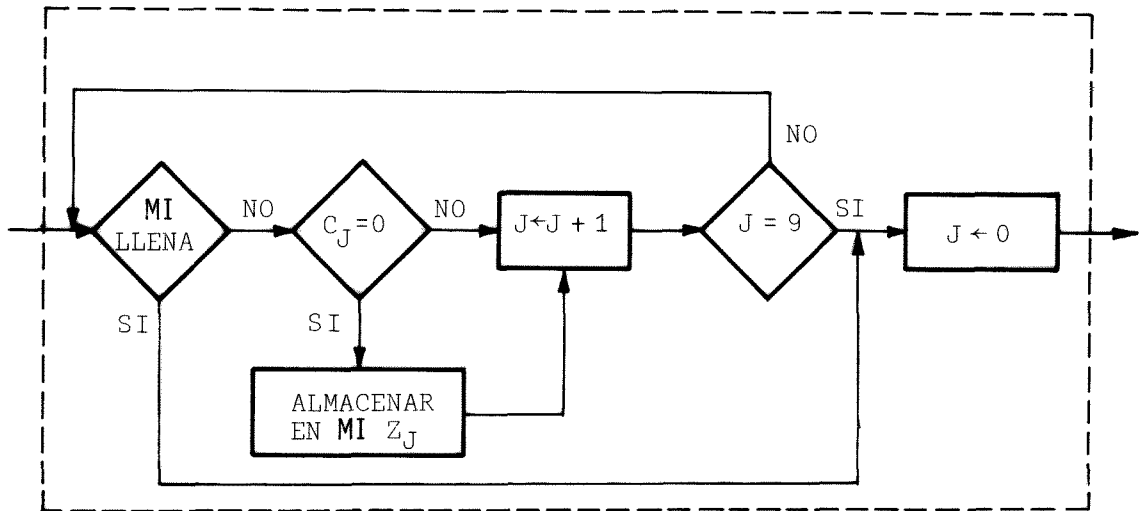
Fig 3.17. Configuración de la palabra de estado utilizada en el Modo Selectivo.

Se han considerado dos modos de almacenamiento: uno el Modo Normal y otro el Modo Selectivo. En el primero ($M_F \leq 1$) se almacenan en cada imagen todas las señales, y en el segundo ($M_F > 1$) cada



(1) Ver Fig 3.18.

Fig 3.16. Esquema de la secuencia secundaria (INTP).



Código empleado en la selección de las señales

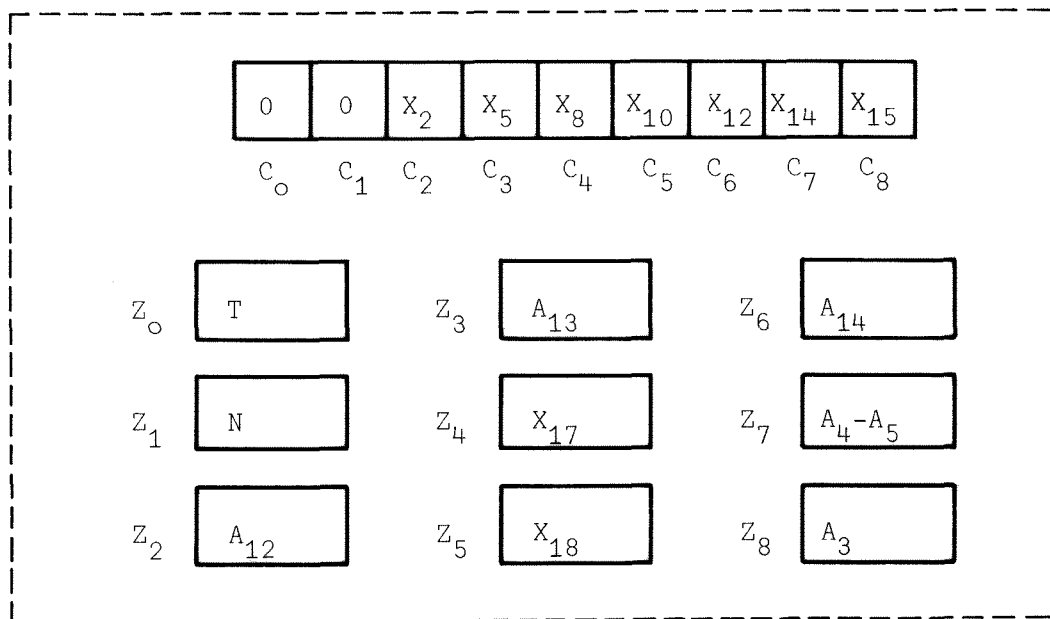


Fig 3.18. Esquema del proceso de selección y almacenamiento de señales en la memoria intermedia (utilizando la palabra de estado).

cierto número de imágenes sólo se almacenan algunas señales seleccionadas.

La razón de emplear dos modos diferentes es la que sigue: la MI, que almacena las señales durante la secuencia secundaria, tiene una capacidad de 20 palabras de 16 bits cada una (320 bits) y es explorado una vez cada segundo por el MSDR para recoger la información y transmitirla a tierra, por lo que el flujo de información es de 20 palabras por segundo.

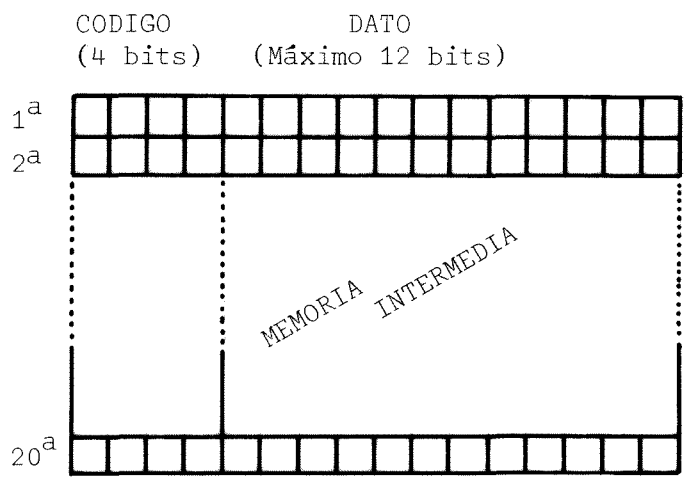
Por otra parte, en un instante dado, toda la información generada por el FPM puede almacenarse en esas 20 palabras, dado que está compuesta de 14 palabras de señales de parámetros, más dos palabras de información de tiempo y número de imagen. Si el número de disparos por segundo (M_F) es menor que 1, entonces todas las señales pueden ser almacenadas. Cuando quieren recogerse todas las señales, la máxima velocidad de adquisición es de una imagen por segundo (Modo Normal). En el caso en que M_F sea mayor que la unidad entonces la información generada por el FPM es mayor que la que puede ser recogida, por lo que ha de seleccionarse la información más necesaria. Para este caso se ha previsto el Modo Selectivo, en el que el almacenamiento de datos se hace cada cierto número de imágenes (cada 3 imágenes en $M_F=8$, cada 6 en $M_F=16$, cada 9 en $M_F=24$), y sólo de aquéllos datos que se seleccionen de acuerdo con la palabra de estado (ver Fig 3.18).

La palabra de estado está formada por un conjunto de señales de control que pueden tomar cada una dos valores: "0" cuando el parámetro correspondiente está variando, y "1" cuando ha alcanzado el estado estacionario. Sólo se almacenarán señales cuando la

señal de control correspondiente sea "0", y siempre que haya espacio en la MI. De esta forma, se reduce el número de señales a almacenar a un número máximo de 9, pero que va disminuyendo a medida que se desarrolla el experimento.

Además de las señales generadas en el FPM se almacenarán dos más, que se generarán en la CC, y que son de gran importancia: una, la información del tiempo (instante en que se ha realizado la fotografía) contado desde el principio del experimento. Con la señal de reloj suministrada por el procesador (que deberá ser de 100 c.p.s. como mínimo) se accionará un contador de 16 bits, en pasos de 50 ms., que podrá contar hasta 3276.85 segundos (54 minutos aproximadamente), suficiente para todos los experimentos previstos hasta la fecha, ya que su duración será inferior. La otra señal es la del número de la imagen tomada, N, que es generada por otro contador de 16 bits accionado por los impulsos de disparo.

Los datos almacenados en la MI estarán codificados para poder identificarlos después de su transmisión a tierra. El código utilizado a tal fin, de 4 bits, se muestra en la Fig 3.19, así como la organización de la MI. La palabra de tiempo, T, que siempre se almacenará delante de la del número de la imagen, N, es la única que no lleva código incorporado, y su identificación deberá hacerse a partir del hecho de que siempre precederá a la del número de la imagen.



Código de identificación de las señales

CODIGO DE IDENTIFI- CACION	DATO (1)	Nº BITS SIGNIFI- CATIVOS
	T(2)	16
0 0 0 1	N	10
0 0 1 0	A ₁	8
0 0 1 1	A ₂	8
0 1 0 0	A ₃	8
0 1 0 1	A ₄ -A ₅	12
0 1 1 0	A ₆ -A ₇	12
0 1 1 1	A ₈ -A ₉	12
1 0 0 0	A ₁₀ -A ₁₁	12
1 0 0 1	A ₁₂	9
1 0 1 0	A ₁₃	9
1 0 1 1	A ₁₄	9
1 1 0 0	X ₁₇	11
1 1 0 1	X ₁₈	11
1 1 1 0	X ₁ X ₂ X ₃ X ₄ X ₅ X ₆ X ₇ X ₈	8
1 1 1 1	X ₉ X ₁₀ X ₁₁ X ₁₂ X ₁₃ X ₁₄ X ₁₅ X ₁₆	8

- (1) En el Modo Normal , en el que se almacenan todas las señales (16 palabras), las cuatro últimas palabras de la M.I. estarán formadas por ceros.
- (2) Esta palabra no lleva código.

Fig 3.19. Configuración de la memoria intermedia (MI) y código de identificación de señales.

4. ESTUDIO SOBRE EL ANALISIS DE LA INFORMACION

4. ESTUDIO SOBRE EL ANALISIS DE LA INFORMACION

La información que se obtiene de los experimentos estará contenida, por una parte, en las fotografías tomadas en el módulo de experimentos (posición de las partículas interiores del fluido, forma de la superficie libre, etc.) y, por otra, en cintas magnéticas que registran las señales generadas por los sensores del módulo (parámetros de funcionamiento: posición de los discos, velocidad de giro de éstos, volumen contenido, etc.). El problema consiste en, a partir de esta información (cuya obtención y objetivo ya se ha expuesto anteriormente), determinar la forma de la superficie libre de la zona (ecuación de la curva meridiana $r=r(z)$) y el campo de velocidades en el seno del fluido (las tres componentes de la velocidad en cada punto) todo ello con la mayor precisión posible.

En el estudio que a continuación se expone se trata de resolver el conjunto de problemas que esto presenta, así como las posibles soluciones que pueden adoptarse a la vista de los medios disponibles.

En el esquema de bloques que se muestra en la Fig 4.1 puede observarse de forma general los diferentes procesos que pueden seguirse para resolver el problema.

El primer caso consiste en clasificar la información recibida, debido a la gran cantidad de datos, para así facilitar su identificación y posterior utilización.

El tratamiento de la información puede realizarse de diferentes formas. Si no se dispusiera de otra cosa, podría emplearse un método de análisis cualitativo visual por personal cualificado, con una selección previa de las fotografías más significativas. Por

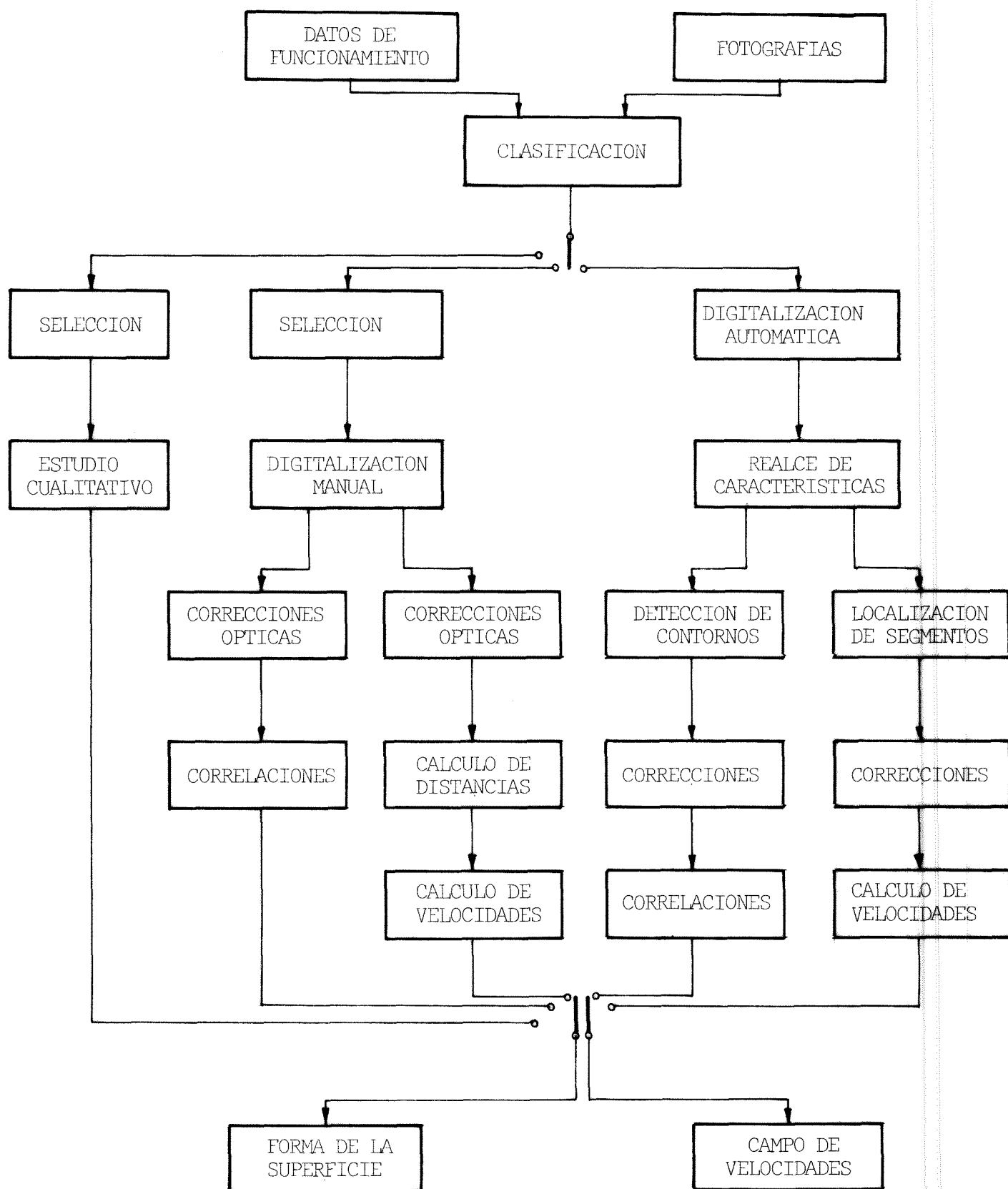


Fig 4.1. Esquema de los diferentes procesos que pueden emplearse para el análisis de la información.

supuesto que en nuestro caso este estudio sería inadecuado e insuficiente. El análisis cuantitativo más sencillo, que puede realizarse de una manera manual, es ir extrayendo los datos más significativos de las fotografías, por medio de un digitalizador, y proceder al tratamiento de estos datos por ordenador. Este método requiere un proceso previo de selección de imágenes de entre el total de fotografías, estudiando aquéllas que contengan la mayor y más conveniente información, para tratar así solamente un número reducido de éstas, debido a la relativa lentitud de la digitalización.

Finalmente, se considera otro método, completamente automático (realizado por ordenador) con digitalización automática de las imágenes, que permite manejar un número más elevado de fotografías que en los casos anteriores y con una mayor precisión en los resultados. Para tratar la imagen digitalizada y hacer posible la extracción automática de las características de las imágenes será necesario utilizar una serie de filtros para limpiar de "ruido" las imágenes y resaltar los contornos y líneas presentes en ellas, así como programas adecuados para el reconocimiento y seguimiento de líneas y contornos. A partir de estas líneas y contornos podrá calcularse la ecuación de la superficie libre y el campo de velocidades mediante el oportuno tratamiento numérico, de modo análogo al caso anterior.

4.1. CLASIFICACION

La información recibida estará contenida en fotografías y en cintas magnéticas. La cantidad total de información será ele-

vada, por lo que habrá que organizarla para su fácil y rápido manejo. El primer paso será reconocer las fotografías, asignándoles unas palabras claves, que designen tanto sus características principales (tipo de fotografía, calidad, número de código, etc.), como los valores de los parámetros de funcionamiento en el momento de la obtención de la fotografía (distancia entre discos, velocidad de éstos, instante de tiempo, etc.).

A cada fotografía se le asignará una ficha que contendrá toda esta información. Estas fichas se utilizarán para seleccionar las fotografías según las diversas características de éstas de una manera cómoda y rápida (sea por tarjetas perforadas o por ordenador). Un posible modelo de ficha puede verse en la Fig 4.2.

FOTO N°						FASE			TIPO			ASUNTO			CALIDAD		
A ₁	_____	A ₉	_____														
A ₂	_____	A ₁₀	_____														
A ₃	_____	A ₁₁	_____														
A ₄	_____	A ₁₂	_____														
A ₅	_____	A ₁₃	_____														
A ₆	_____	A ₁₄	_____														
A ₇	_____	X ₁₇	_____														
A ₈	_____	X ₁₈	_____														
TIEMPO _____																	
X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆		

Fig 4.2. Modelo de ficha clasificadora.

En lo que sigue, se denominará tipo 1 a las fotografías que visualizan la forma de la superficie de la zona; tipo 2 a las que visualizan el movimiento en el plano meridiano, y tipo 3 a las que lo hacen en un plano perpendicular al eje de rotación.

4.2. ANÁLISIS CUALITATIVO VISUAL

Este método se basa en la comprobación de las predicciones teóricas mediante la comparación con los resultados que se obtengan de las fotografías.

Un observador cualificado, analizando las fotografías del tipo 1 que presenten la rotura de la zona y las condiciones en que ésta ocurre (distancia entre discos, velocidad de éstos, frecuencia y amplitud de la vibración, volumen, etc.) puede determinar la aproximación que tienen los resultados teóricos referentes a este apartado.

También se puede determinar, por el análisis visual de las fotografías tipos 2 y 3, la existencia de capas límite, capas de cortadura, torbellinos y otras características del movimiento del interior del fluido, así como sus posiciones y espesores, en los diferentes casos de movimiento: arranque, contra-rotación, frenado, etc., y comprobar la validez de las hipótesis y predicciones teóricas al respecto.

Será necesario hacer una selección previa de aquéllas fotografías que muestren más claramente los fenómenos que tratan de valorarse, utilizando el fichero de datos mencionado anteriormente. El número de las fotografías utilizadas en este análisis ha de ser forzosamente muy reducido, siendo de capital importancia la

pericia del observador.

4.3. ANALISIS CUANTITATIVO MANUAL

Las conclusiones y resultados que se esperan obtener a partir de las imágenes tomadas en el Spacelab están basadas en un estudio cuantitativo de ellas, habiendo sido este punto uno de los objetivos de diseño del aparato experimental. Como mínimo, se espera realizar un análisis cuantitativo manual que constaría de las etapas siguientes:

4.3.1. Selección de la información

Como primer paso de este método se requiere una selección de las fotografías a analizar, por ser un proceso relativamente lento (lo que limita el número de fotografías a tratar).

Los criterios de selección a aplicar serán:

- Riqueza de información: cantidad elevada de datos que muestra la fotografía.
- Presentar un fenómeno característico de estudio (rotura de la zona, comienzo del giro, etc.).
- Facilidad de extracción de datos.
- Calidad de la fotografía.

Las fotografías que se emplearán serán de los tres tipos descritos anteriormente.

4.3.2. Digitalización manual

Una vez seleccionado el material, se extrae (de la fotografía) mediante digitalización manual, la posición de los puntos

de interés (puntos del contorno de la zona y puntos extremos de las líneas formadas por los trazadores). Este proceso lo realiza un operador con la ayuda de un aparato digitalizador como el que se muestra en la Fig 4.3, que consta básicamente de dos elementos: un cursor y una superficie plana (con inclinación ajustable para trabajar más cómodamente). La fotografía o imagen a digitalizar se fija sobre la superficie y se procede de la manera siguiente: el operador examina la fotografía, selecciona las líneas que contienen la información buscada y señala con un cursor los puntos de esas líneas, cuya posición determina automáticamente el digitalizador con gran precisión.

El modelo que se empleará es un HP 9874 Digitizer, que tiene las siguientes características:

- Microprocesador con 16 K-bytes de memoria.
- Resolución: 25 micras.
- Posibilidad de proyección posterior de imágenes sobre la superficie de trabajo.
- Sistema de cursor diáfano que permite colocar éste con gran precisión.
- Punzón para trazar con rapidez curvas, líneas o formas irregulares.
- Un teclado de control con funciones especiales e incorporación numérica de datos.
- Cuarenta instrucciones gráficas diferentes para simplificar la programación y aumentar la eficiencia de la comunicación.
- Alineación automática de ejes, entre los de la fotograa

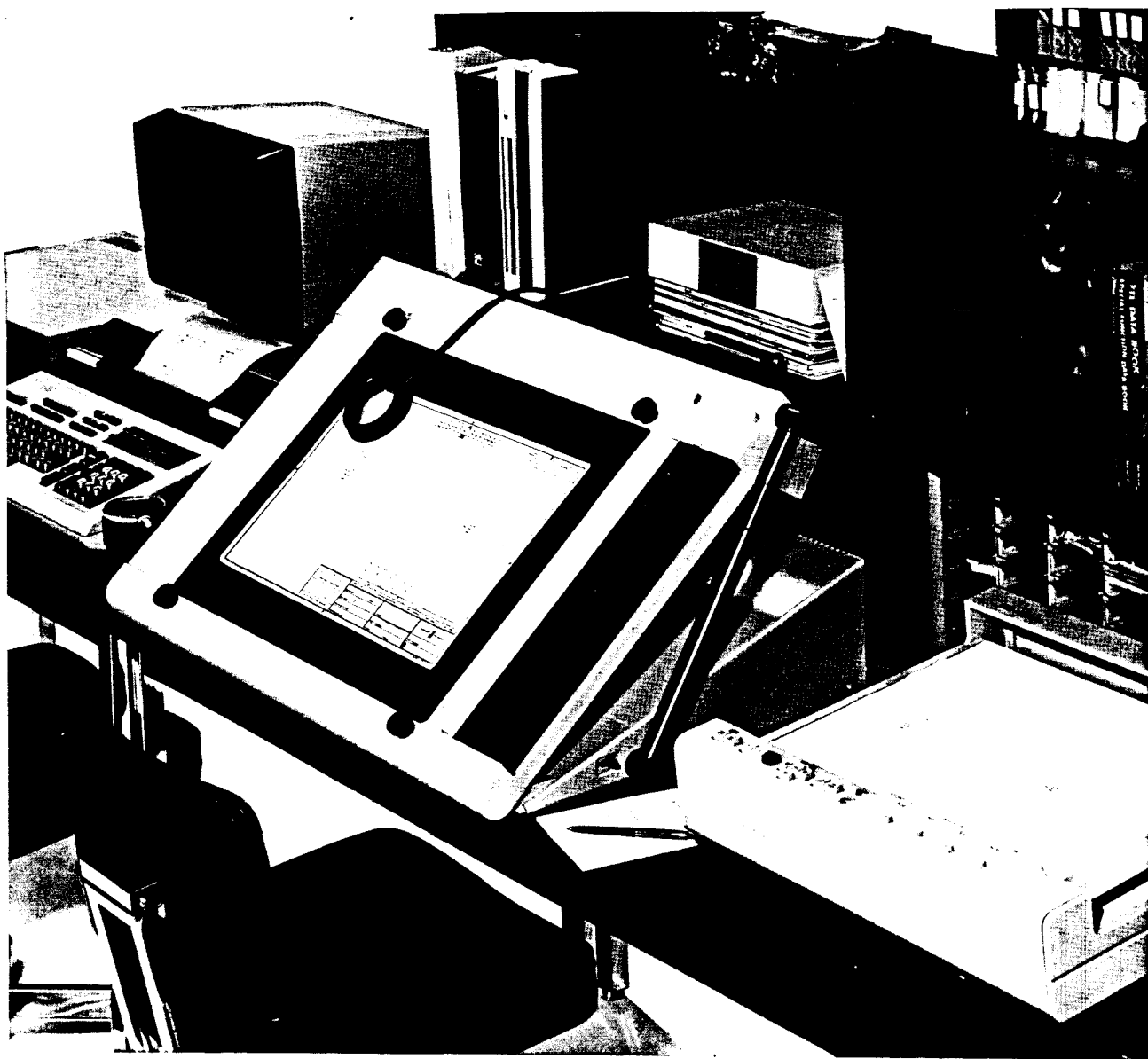


Fig 4.3. Aparato digitalizador.

fía y los del aparato. Hace todas las rotaciones y traslaciones automáticamente. Todos los puntos enviados al computador están referidos al nuevo sistema de coordenadas.

- Funciones especiales que inician subrutinas en el programa.
- Anotación de datos. Es posible hacer anotaciones numéricas que se añaden a puntos específicos. En la pantalla se comprueba la anotación antes de enviarla al computador.

4.3.3. Tratamiento automático de datos

Este proceso tiene como fin calcular el valor de las tres componentes del vector velocidad en los puntos del interior del fluido y la ecuación de la curva del contorno de la sección meridiana de la zona, a partir de los datos proporcionados por el digitalizador (coordenadas de los puntos pertenecientes a las líneas del contorno de la zona y a las trayectorias de los trazadores). Estos objetivos presentan diferentes problemas, por lo que se utilizarán para su resolución procesos diferentes, como se verá a continuación. Todas las operaciones que se hayan de realizar se efectuarán por ordenador, para lo que se diseñarán los programas adecuados.

4.3.3.1. Determinación del campo de velocidades.

El proceso que se seguirá para determinar el campo de velocidades a partir de los datos suministrados por el digitalizador

es el que se muestra en la Fig 4.1.

• Correcciones de efectos ópticos.

Como los rayos luminosos que impresionan las fotografías han recorrido en su trayectoria medios con distintos índices de refracción, estos rayos se refractan en la superficie de separación, de manera que la posición que se observa de las fuentes luminosas (trazadores) no es la real, por lo que será necesario hacer las correcciones oportunas. Como este trayecto es diferente en las fotografías tipo 2 y en las tipo 3, las correcciones ópticas a efectuar serán diferentes en uno y otro caso.

Para determinar las correcciones a efectuar en las fotografías tipo 2 para poder conocer la verdadera posición de los puntos obtenidos de dichas fotografías, se ha realizado un estudio de las características ópticas del conjunto, que considera los siguientes puntos:

- Divergencia de los rayos luminosos.
- Refracción de los rayos luminosos en la superficie de transición líquido-aire.
- Luminosidad de los puntos del plano meridiano.

Para facilitar el estudio de la divergencia de los rayos luminosos, se considerará primero la proyección de la trayectoria de un rayo luminoso en un plano perpendicular al eje de rotación (caso 1); después la proyección sobre un plano que contiene al eje de rotación y pasa por el punto de contacto del rayo con la superficie (plano normal; caso 2).

En el caso 1, la distancia existente entre el centro óptico de la lente y el plano del objeto, hace que los rayos lumino-

sos que llegan a la lente no sean paralelos, sino que existe una determinada convergencia hacia ésta. Esto introduce un error en las observaciones, debido a que no se ve la verdadera dimensión del plano meridiano, D , sino $2R'$, tal como puede observarse en la Fig 4.4.

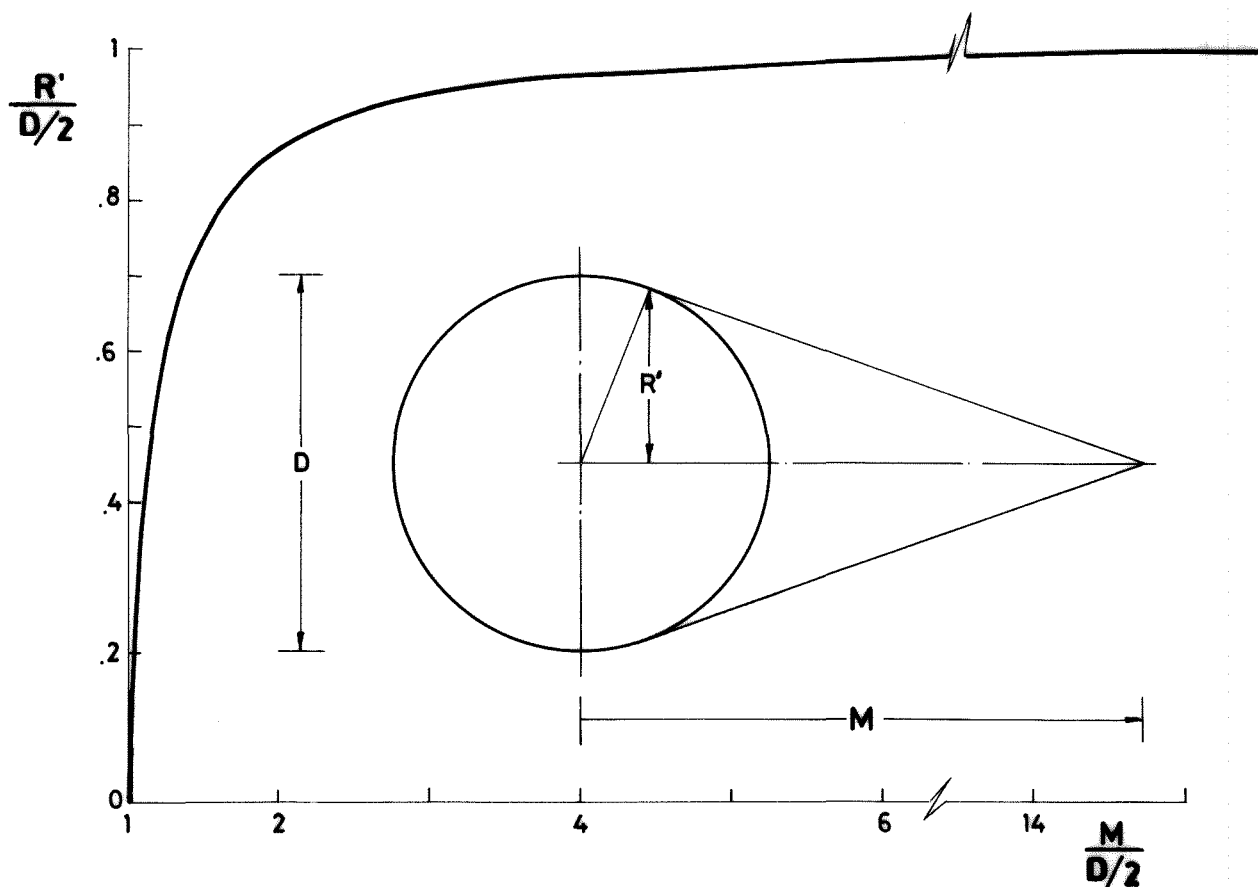


Fig 4.4. Convergencia de los rayos y variación del tamaño observado de la zona con la distancia al punto de observación.

Para valorar el error que se comete, se ha calculado R' como función de la distancia al punto de observación, M . Si adimensionalizamos con $D/2$, entonces $2r'$ será la dimensión de la imagen observable y $m=2M/D$ será la distancia del centro óptico de la lente al plano del objeto. Se obtiene $r'=\sqrt{1-1/m^2}$ que se presenta en

la Fig 4.4. Para calcular el error que se comete con la configuración existente, se ha tomado $D=60$ mm y $M=455$ mm, de donde se deduce que $r'=.9978$ y $m=15.16$, con lo que el error relativo es $1-r'=.00217$ y el error absoluto $(D/2)(1-r')=.065$ mm, lo que indica que se pueden considerar los rayos luminosos procedentes de la zona como si fuesen paralelos, cometiendo un error menor del .3% (en el caso de los puntos periféricos).

El considerar los rayos luminosos como paralelos introduce una simplificación importante para realizar un primer estudio del problema.

En el caso 2, al ser $M/(D/2)$ menor que en el caso anterior, no pueden considerarse los rayos como paralelos, por lo que habrá de tenerse en cuenta en el estudio de la refracción de los rayos la convergencia de éstos hacia la lente.

En el estudio de la refracción de los rayos luminosos en la superficie de separación líquido-aire, se analizarán, como en el apartado anterior los casos 1 y 2 por separado, introduciendo en su caso las simplificaciones deducidas.

En el caso 1, los rayos luminosos procedentes del sistema de iluminación correspondiente, inciden sobre los trazadores, siendo reflejados por éstos. Estos rayos atraviesan después la superficie de la zona, incidiendo en la lente de la cámara. Al atravesar la superficie de la zona que separa dos medios con distintos índices de refracción, sufren una desviación, que hace que la posición observable de los puntos internos del líquido no sea la verdadera, como se muestra en la Fig 4.5, donde se ve la proyección de la trayectoria en una sección de la zona, sobre el plano considerado.

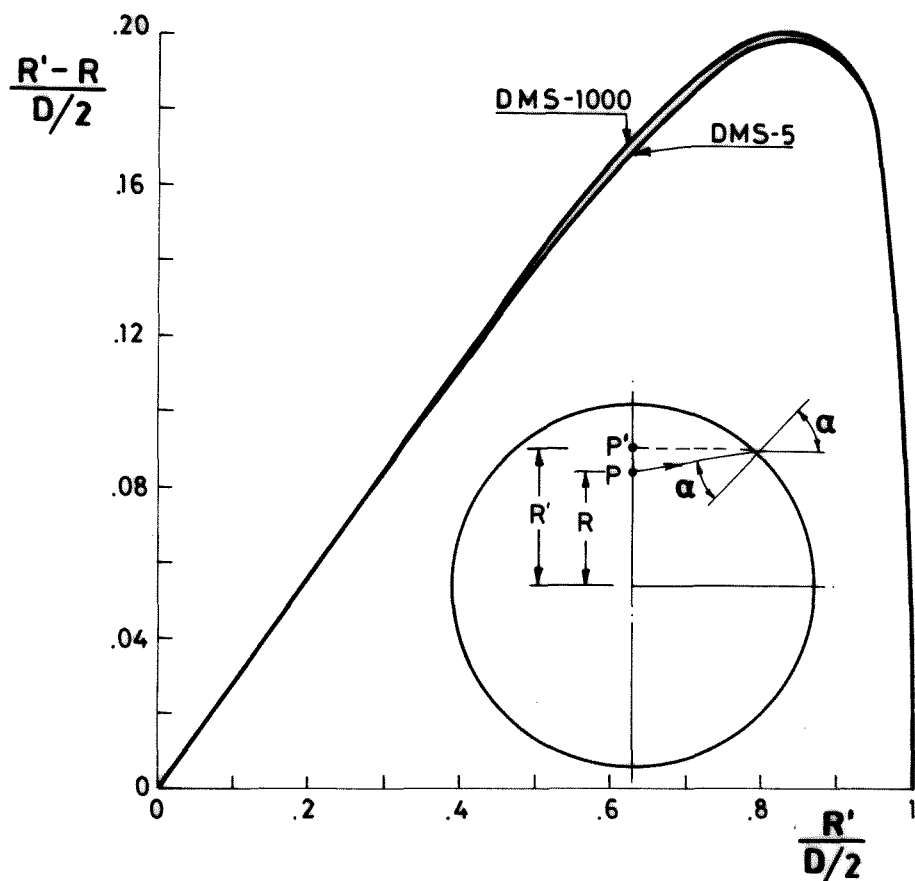


Fig 4.5. Refracción en la superficie de la zona (caso 1) y corrección correspondiente.

El punto P, del plano meridiano, situado a una distancia R del punto 0, se ve en la posición P', a una distancia R' de 0 en el plano meridiano.

Se ha calculado la desviación en la posición, adimensionalizada con D/2, $2(R-R')/D$ que afectará a los puntos que en la fotografía estén a una distancia R' del eje, siendo ésta:

$$r'-r = 2(R'-R)/D = r' \left(1 - \frac{1}{\sqrt{(1-r'^2)(n^2-r'^2)+r'^2}} \right) = f(r')$$

y se ha representado $r'-r$ en función de r' en la Fig.4.5.

Como valores del índice de refracción, n, se han tomado los de los líquidos de experimentación: dimetilsiliconas DMS-5 y

DMS-1000, que son $n=1.3970$ y $n=1.4033$, respectivamente.

Los valores encontrados para $r'-r$ son muy próximos para ambos líquidos, como se ve en dicha figura. Como se conoce la diferencia entre la verdadera posición y la aparente, en función de esta última, habrá de hacerse la corrección oportuna a los puntos almacénados, procedentes del digitalizador. Así, para el punto de la fotografía $P(z,r')$ se hará la corrección que transforma r' en r , verdadera posición del punto P donde $r=r'-f(r')$.

Para el estudio de este apartado se ha considerado la hipótesis de que los rayos que son emitidos desde la zona hacia la lente de la cámara son paralelos, hipótesis justificada en el estudio anterior, lo que simplifica notablemente el cálculo.

En el caso 2 hay que considerar el esquema que se muestra en la Fig 4.6.

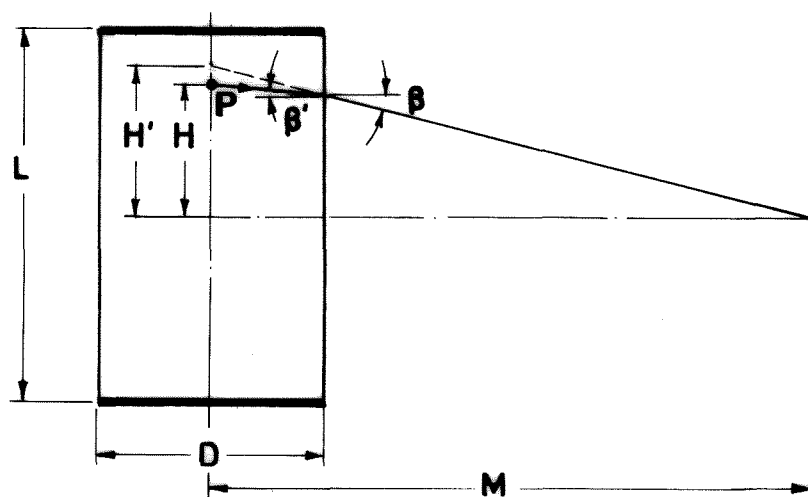


Fig 4.6. Refracción en la superficie de la zona (caso 2).

En él puede observarse la proyección de la trayectoria en un rayo luminoso sobre el plano considerado, que incide en la lente procedente del punto P , donde H' es la posición que se observará en la

fotografía y H es la verdadera posición.

Para calcular H se ha obtenido la siguiente expresión, adimensionalizada con $D/2$:

$$h' - h = \frac{2(H' - H)}{D} = \frac{h'}{m} - \operatorname{tg} \left| \arcsen \left(\frac{h'}{n\sqrt{h'^2 + m^2}} \right) \right| ,$$

donde $m = \frac{M}{D/2}$.

Esta expresión es válida en el caso del plano normal que pasa por el eje óptico. En el caso general, en el que esto no ocurre, se ha de considerar la trayectoria que se muestra en la Fig 4.7.

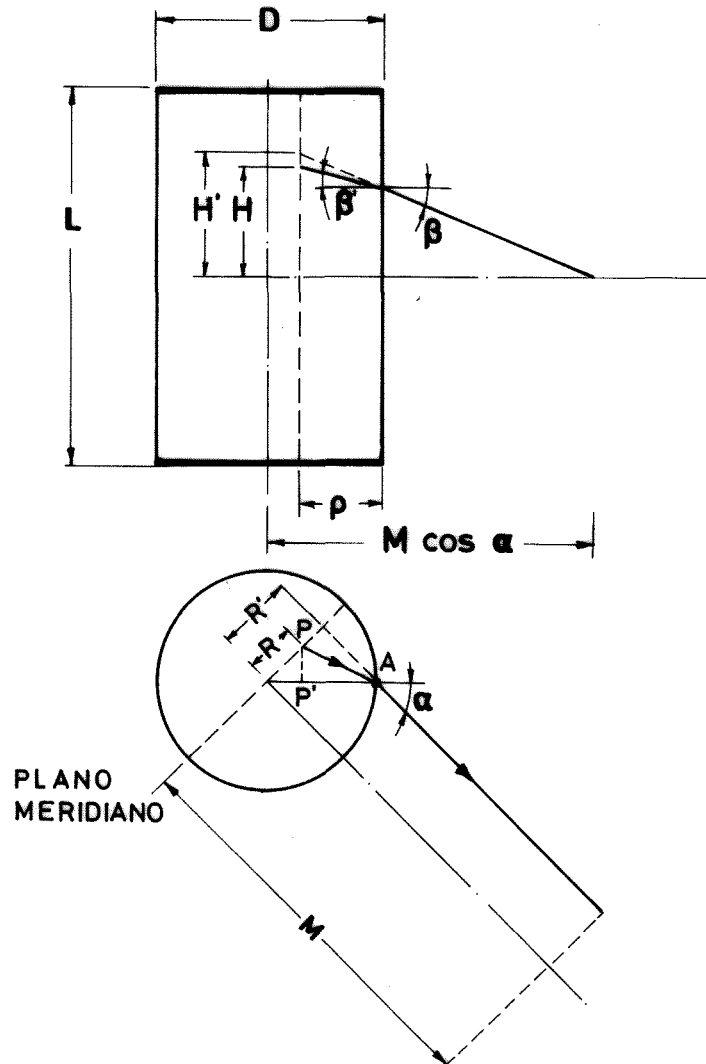


Fig 4.7. Refracción en la superficie de la zona (caso general).

La proyección del camino recorrido en el seno del líquido que se debe considerar no es $D/2$ como se ha hecho en el caso anterior, sino la proyección de PA sobre el plano normal, $P'A$:

$$P'A = \rho = \frac{D}{2} - r \frac{r'}{D/2} .$$

Adimensionalizando con $D/2$ y teniendo en cuenta lo expuesto, resulta la expresión siguiente:

$$h' - h = \left(1 - \frac{r'^2}{\sqrt{(1-r'^2)(n^2-r'^2)} + r'^2} \right) \cdot \left(\frac{h'}{m\sqrt{1-r'^2}} - \text{tg arc sen } \frac{h'}{n\sqrt{h'^2+m^2(1-r'^2)}} \right) = g(r', h') ,$$

que se representa en la Fig 4.8.

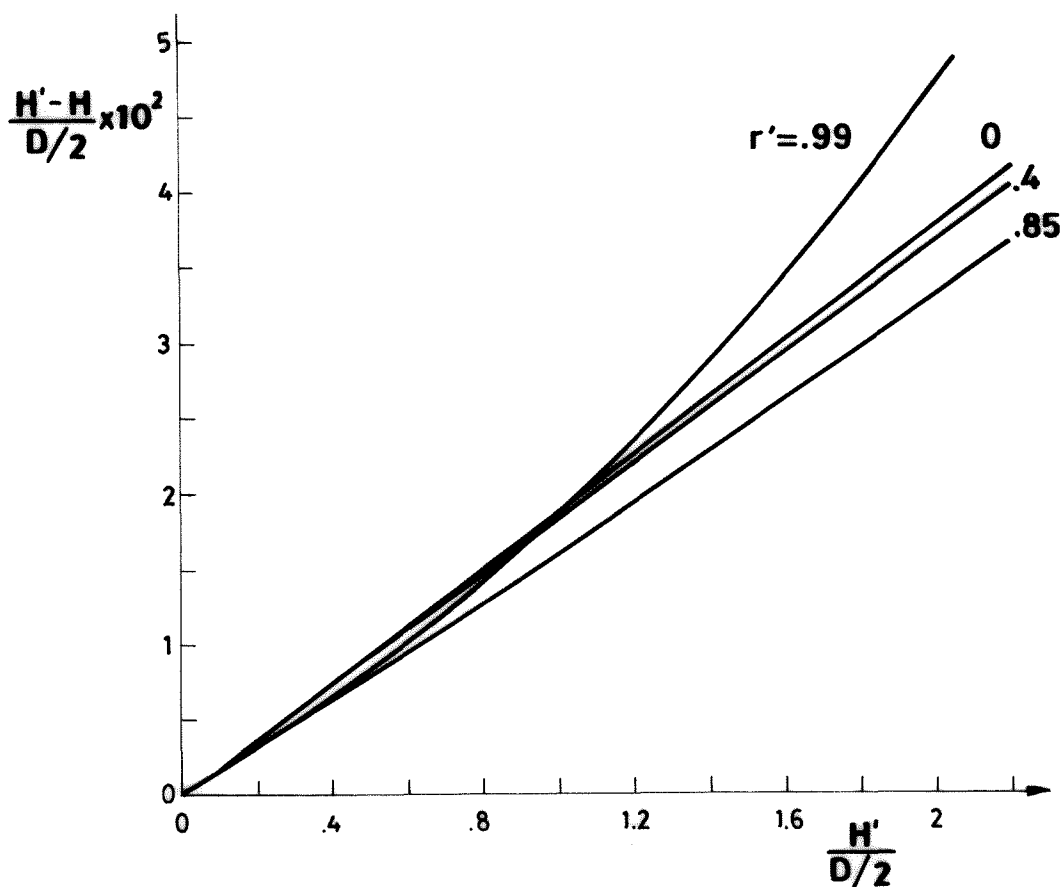


Fig 4.8. Corrección debida a la refracción en la superficie de la zona (caso general).

Estos cálculos se han hecho con la hipótesis de que la forma de la zona es cilíndrica. En aquellos casos en que esta hipótesis no sea válida, será necesario, para determinar β y β' , calcular la normal en los puntos de la superficie de la zona a partir de la ecuación de ésta, e introducir las oportunas correcciones en las fórmulas expuestas anteriormente.

La corrección que se introducirá en el cálculo de la verdadera posición de los puntos del plano meridiano, debido a los efectos considerados será la siguiente: conocida la posición de un punto en la fotografía $P(r', h')$ se calculará su verdadera posición $P(r, h)$ con la ayuda de las expresiones encontradas, con las que se obtiene que $r=r'-f(r')$ y $h=h'-g(r', h')$.

En el estudio de la luminosidad de los puntos del plano meridiano se ha considerado la variación de la luminosidad de los rayos que llegan a la lente procedentes de los trazadores existentes en los distintos puntos del plano meridiano, en función de las distancias observables de éstos al eje de rotación. Esta variación de la luminosidad se debe a que al variar el ángulo de incidencia de un rayo luminoso sobre una superficie que separa dos medios de distinto índice de refracción varía la intensidad de la luz transmitida y la de la reflejada.

En el caso que se trata, al variar la posición de un punto, varía el ángulo de incidencia con la superficie de la zona del rayo luminoso que, procedente de él, llega a la lente. En la Fig 4.9 se muestra el fenómeno: un punto P situado en el plano meridiano refleja un rayo I, que incide en la superficie de la zona, dando origen a un rayo transmitido T que es recogido por la lente de

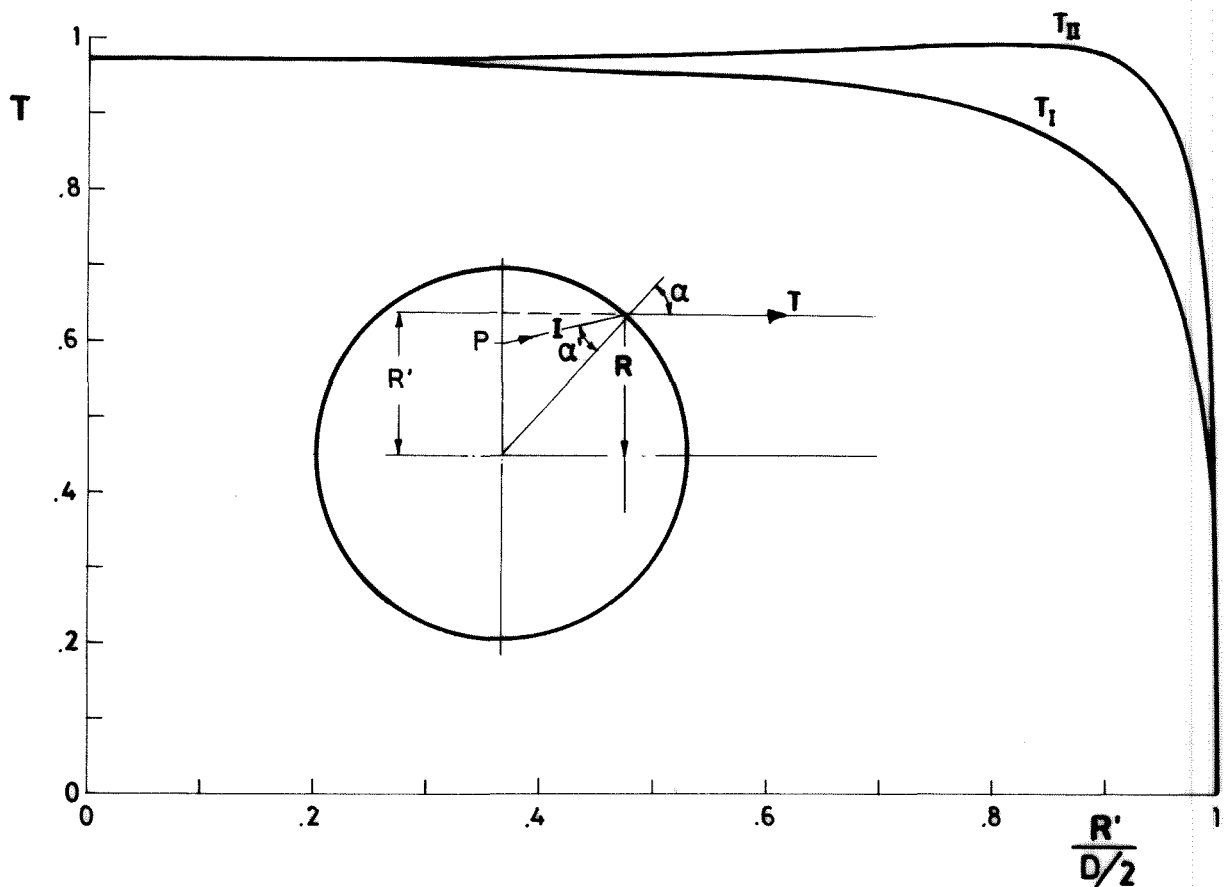


Fig 4.9. Trayectoria de los rayos incidente, I (procedente del punto P), transmitido, T, y reflejado, R. Variación de la transmitancia T en función de la posición aparente, $2R'/D$, del punto P.

la cámara, y a otro reflejado en la superficie, R.

En la hipótesis de que la intensidad de los rayos procedentes de las diferentes posiciones ($0 < r < 1$) del punto P es siempre la misma se ha calculado la transmitancia T y la reflectancia R, siendo:

$$T = 1 - R$$

Considerando R y T en componentes:

$$T_1 = 1 - R_1 = 1 - \frac{\sin^2(\alpha' - \alpha)}{\sin^2(\alpha' + \alpha)} = 1 - \frac{(\sqrt{1 - r'^2} - \sqrt{n^2 - r'^2})^4}{(1 - n^2)^2}$$

$$T_{\parallel} = 1 - R_{\parallel} = 1 - \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha' - \alpha)}{\operatorname{tg}^2(\alpha' + \alpha)} = 1 - \frac{\operatorname{tg}^2\{\arcsen(r'/n) - \arcsen r'\}}{\operatorname{tg}^2\{\arcsen(r'/n) + \arcsen r'\}} \quad .$$

Con la ayuda de estas fórmulas se han representado en la Fig 4.9 T_{\perp} y T_{\parallel} en función de r' , posición aparente del punto del plano meridiano. Como puede verse, la transmitancia es muy elevada ($>.9$), excepto en una franja muy delgada ($\sim .4$ mm) de la parte más externa del plano meridiano. Esto quiere decir que podrá observarse bien la mayor parte del plano meridiano, a excepción de una franja periférica muy delgada, en donde se desarrolla el fenómeno de reflexión total interna.

De las conclusiones obtenidas de los estudios anteriores, se infiere que se puede conocer la verdadera posición de los puntos observados $P(r,z)_{\pi}$ y el modo de calcularla, así como que será visible casi completamente el movimiento en el plano meridiano, existiendo únicamente una zona muy pequeña no observable con la actual configuración del sistema.

Al estudiar las correcciones a efectuar en las fotografías tipo 3, hay que considerar que la visualización de los puntos del plano perpendicular al eje de rotación se realiza recogiendo los rayos luminosos procedentes de los trazadores por medio del sistema descrito anteriormente. Como puede observarse, estos rayos atraviesan medios con distintos índices de refracción, por lo que sufrirán en la superficie de separación de ambos una desviación en la refracción.

En la Fig 4.10 puede observarse el fenómeno: el punto que se verá en la fotografía será el P' , que es la imagen del punto verdadero P , situados a distancias R' y R , respectivamente, del eje óptico.

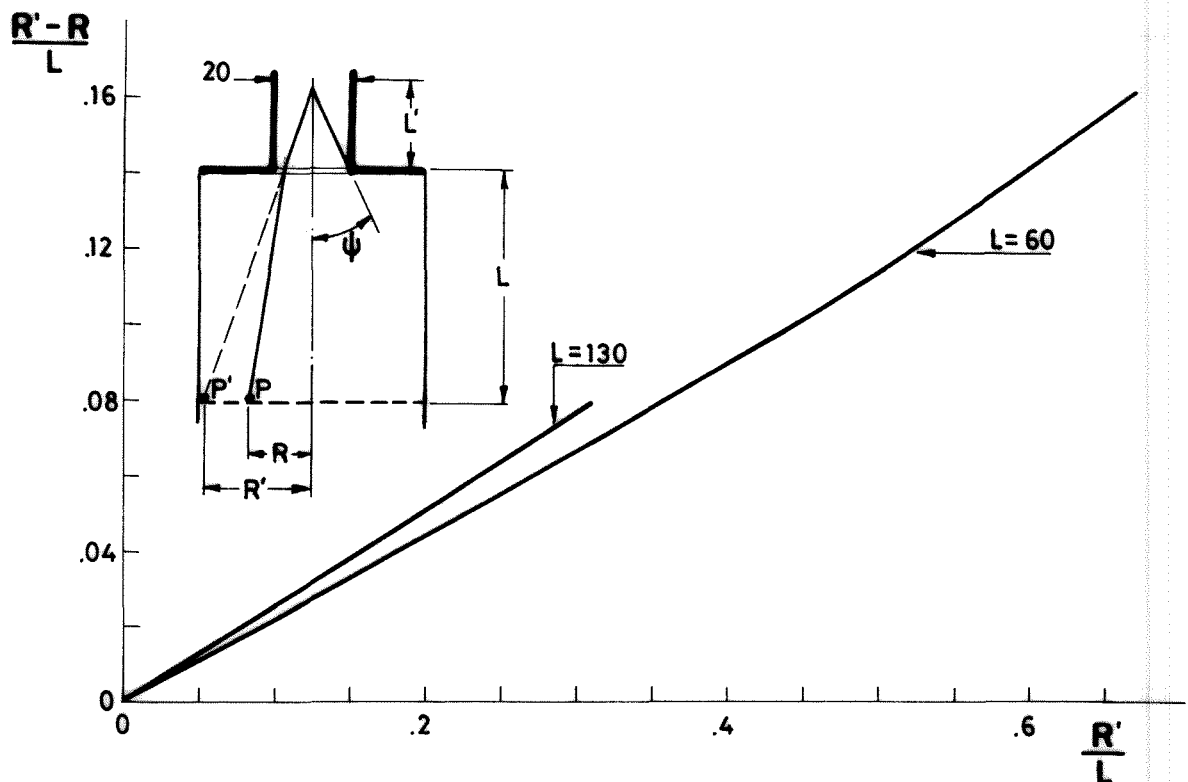


Fig 4.10. Refracción en la superficie del líquido en contacto con el disco y corrección debida a ella. (Cotas en mm).

Cálculos realizados han permitido deducir la siguiente expresión:

$$r'-r = \frac{(R'-R)}{L} = \frac{1}{1+l'} \left| r' - \operatorname{tg} \arcsen \left(\frac{r'}{n\sqrt{(1+l')^2 + r'^2}} \right) \right| ,$$

donde las magnitudes están adimensionalizadas con L , y $l' = \frac{a}{2\operatorname{tg}\psi}$, siendo ψ el ángulo máximo de divergencia de los rayos, y $l' = L'/L$.

En la Fig 4.10 se ha representado $r'-r$ como función de r' con ayuda de la fórmula anterior, para los casos extremos, $L=60$ mm. y $L=130$ mm.

• Cálculo de distancias

El cálculo de las proyecciones de la velocidad en los planos meridiano, π , y perpendicular al eje de rotación, π' , requie

re el conocimiento de la longitud de los segmentos de las trayectorias de los trazadores recogidos en las fotografías (véase la Fig 4.11).

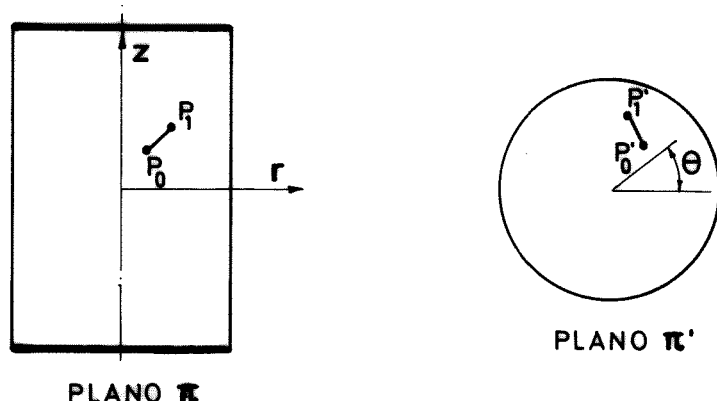


Fig 4.11. Esquema de las trayectorias de los trazadores.

Estas longitudes se determinan fácilmente, a partir de las coordenadas verdaderas de los puntos de las trayectorias calculadas en el paso anterior, como a continuación se muestra.

La longitud l de un segmento de trayectoria $\overline{\Delta r}$, que pueda considerarse rectilíneo, conocidos los puntos extremos, $P_0(r_0, z_0)$ y $P_1(r_1, z_1)$, es:

$$l = \sqrt{(r_0 - r_1)^2 + (z_0 - z_1)^2} \quad .$$

En el caso de que este segmento no pueda considerarse aceptablemente rectilíneo, se tomarán una serie de puntos intermedios $P_0, P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n$, calculándose la longitud, l , del segmento según la expresión:

$$l = \sum_{i=1}^n l_i \quad ,$$

siendo l_i :

$$l_i = \sqrt{(r_{i-1} - r_i)^2 + (z_{i-1} - z_i)^2} \quad .$$

Como los puntos P_i pertenecen al plano π , el cálculo proporciona la longitud del segmento de trayectoria proyectada sobre el plano π en el punto P_0 , $l = |\overline{\Delta r}_{P_0}|_{\pi}$.

Análogamente, calculando con los puntos P'_0, P'_1 , pertenecientes al plano π' , se obtiene la longitud del segmento de trayectoria proyectada sobre el plano π' , $l = |\overline{\Delta r}_{P'_0}|_{\pi'}$.

• Cálculo de velocidades

El vector velocidad en un punto $P(r, \theta, z)$ tendrá en general tres componentes:

$$V_r = V_r(r, \theta, z)$$

$$V_{\theta} = V_{\theta}(r, \theta, z)$$

$$V_z = V_z(r, \theta, z) \quad .$$

Por el modo de efectuar los experimentos se estará en condiciones de calcular $V_r(r, z)$ y $V_z(r, z)$ en una gran cantidad de puntos, y no se podrá encontrar su dependencia de la coordenada θ ni $V_{\theta}(r, \theta, z)$, salvo para unos pocos valores de z .

Los estudios teóricos realizados permiten hacer la hipótesis de que el movimiento, salvo en un número reducido de ocasiones, será axilsimétrico, lo que quiere decir que $\partial V_i / \partial \theta = 0$, es decir V_r, V_{θ}, V_z no dependerán de la coordenada θ .

La validez de esta hipótesis se comprobará mediante la aplicación de la ecuación de la continuidad:

$$\frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r V_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_{\theta}}{\partial \theta} = 0 \quad .$$

es decir, calculando el valor de $\partial V_{\theta} / \partial \theta$, en aquellos puntos en los que se conozcan el valor de V_r y V_z .

Con los resultados del paso anterior se calcularán, por

un lado, la proyección de la velocidad en el plano π en los diferentes puntos P existentes en éste, $(V_{\pi})_P$, y por otro la proyección de la velocidad en el plano π' en sus diferentes puntos P', $(V_{\pi'})_{P'}$, mediante las expresiones siguientes:

$$(V_{\pi})_P = \frac{|\overline{\Delta r}_P|_{\pi}}{\Delta t}$$

$$(V_{\pi'})_{P'} = \frac{|\overline{\Delta r}_{P'}|_{\pi'}}{\Delta t}$$

Δt , que es el tiempo de exposición, es el tiempo que la partícula ha tardado en recorrer el segmento de trayectoria utilizado para calcular $|\overline{\Delta r}|$.

Las componentes de la velocidad V_r , V_z , (ver Fig 4.12) se calcularán a partir de V_{π} mediante las expresiones:

$$V_r = V_{\pi} \cos \beta ; \quad V_z = V_{\pi} \sin \beta$$

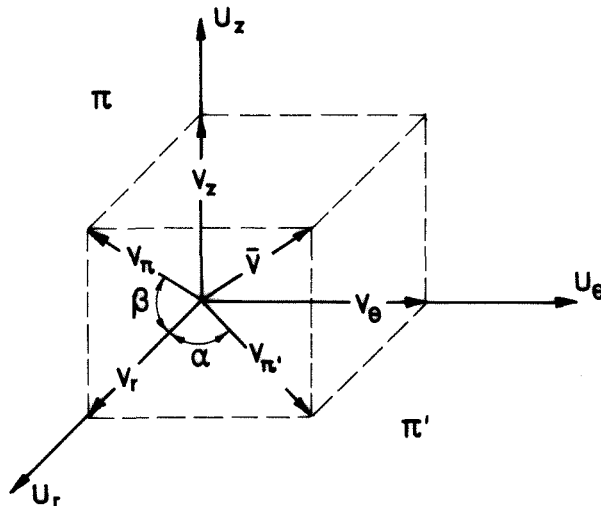


Fig 4.12. Esquema de las proyecciones del vector \vec{V} en el plano meridiano, π , y en el plano perpendicular al eje de rotación, π' .

La componente V_θ se calculará a partir de la $V_{\pi'}$:

$$V_\theta = V_{\pi'} \sin \alpha$$

y también:

$$V_r = V_{\pi'} \cos \alpha$$

como

$$V_{\pi} = V_{\pi}(r, z) \quad \text{y} \quad V_{\pi'} = V_{\pi'}(\theta, r),$$

entonces se puede calcular $V_r = V_r(r, z)$, $V_z = V_z(r, z)$, y en los puntos de los planos π' se podrá calcular $V_r(r, z_0, \theta)$, $V(r, z_0, \theta)$, donde z_0 es la coordenada del plano π' .

Salvo en un número reducido de puntos (de los planos π') no es posible determinar, tal como está diseñado el sistema de visualización, la componente V_θ de la velocidad. Con dicho sistema se determinan los módulos de las otras componentes, pero no su signo. Ambos problemas provienen de que la información que puede extraerse de las fotografías (bidimensionales) es insuficiente. Actualmente están en estudio un sistema de triangulación de puntos y otro de barrido tridimensional, para tratar de encontrar una solución satisfactoria.

4.3.3.2. Determinación de la forma de la superficie externa de la zona.

Uno de los principales objetivos de los experimentos es determinar la forma externa de la zona, con una elevada precisión, por lo que será necesario estudiar detenidamente los fenómenos físicos que influyen en la definición de la forma externa a partir de las imágenes fotográficas.

La definición del objeto está limitada por los siguientes

fenómenos: difracción en el contorno de la superficie, existencia de una zona de sombras en la imagen debida a la tridimensionalidad del objeto, reflexión de rayos luminosos en un área cercana al contorno y, finalmente, convergencia de los rayos que llegan a la lente debido a la distancia finita del punto de observación.

• Difracción en el contorno de la zona

El fenómeno de la difracción de la luz en un cuerpo tridimensional es muy complejo, conociéndose soluciones únicamente en algunos casos particulares de geometría sencilla.

El estudio del caso más simple, la difracción que tiene lugar en el borde de un semiplano iluminado, puede ser de gran ayuda. En la Fig 4.13 se muestra la distribución de luz de la imagen de dicho semiplano obtenida (con una lente) usando luz coherente y luz incoherente, siendo ω el semiángulo con el que se ve la lente desde el objeto. En nuestro caso, aunque el sistema de iluminación

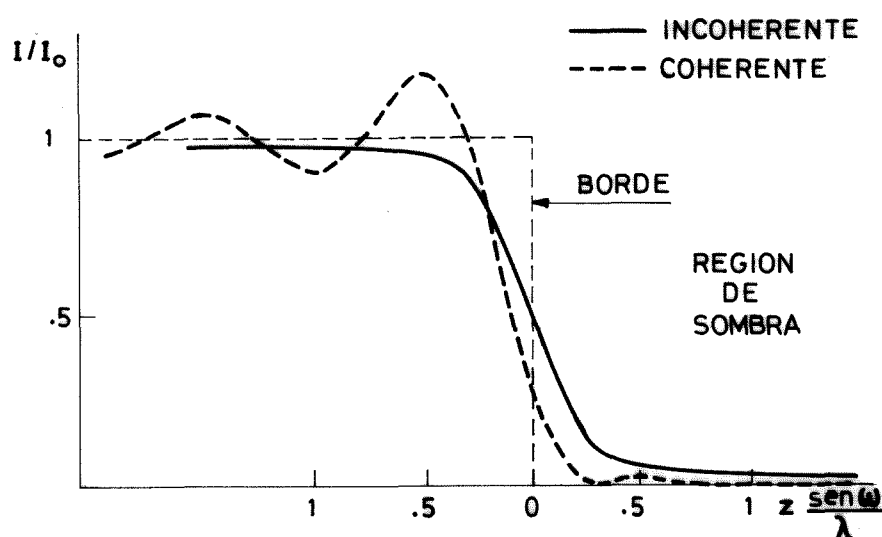


Fig 4.13. Distribución de iluminación de la imagen obtenida de un semiplano iluminado con luz coherente e incoherente.

es muy direccional, la iluminación puede considerarse incoherente. Con esta hipótesis se ha calculado la resolución, ϵ , obtenida en el plano del objeto, en función de la variación de iluminación, que se ha considerado simétrica respecto al punto donde está situado el borde. Los resultados obtenidos se muestran en la Fig 4.14 en forma de gráfico, con el que puede calcularse la resolución en el plano del objeto para diferentes niveles de iluminación.

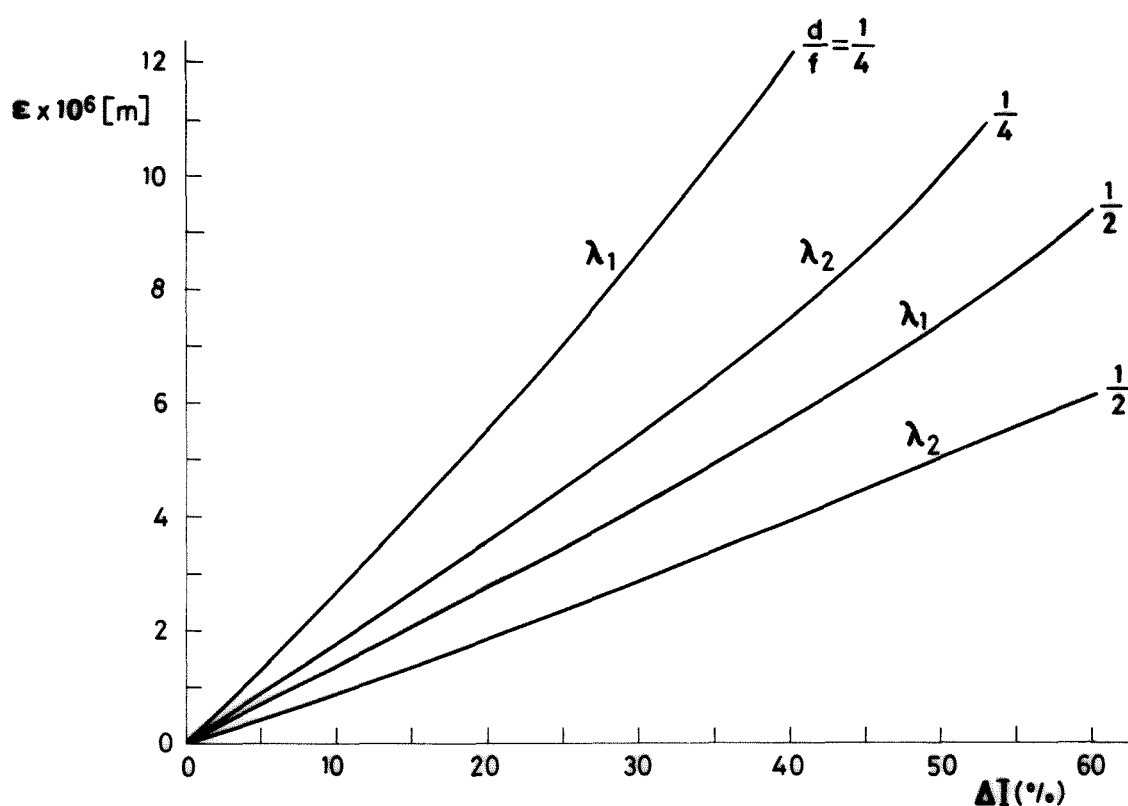


Fig 4.14. Resolución en el plano del objeto, ϵ , en función de la variación de iluminación detectada, ΔI . ($\lambda_1 = .65 \times 10^9$ m, $\lambda_2 = .43 \times 10^9$ m).

Para evitar que el objeto aparezca de mayor tamaño del que realmente tiene, hay que conseguir que la película no se sature al impresionarla.

•Tridimensionalidad del objeto

Lo anteriormente expuesto es aplicable únicamente a un objeto delgado. En nuestro caso, el objeto tiene espesor (es casi cilíndrico), lo que implica tener que considerar la tridimensionalidad de éste en un análisis del conjunto mediante óptica geométrica.

Como se muestra en la Fig 4.15, debido a la curvatura del objeto (de radio R), el rayo tangente, AO , que pasa a través del centro del diafragma de la lente, es el único de todos los que pasan por A que alcanza la película (si se excluye el fenómeno de reflexión). Los rayos BS y BS' , tangentes al cilindro, y que pasan

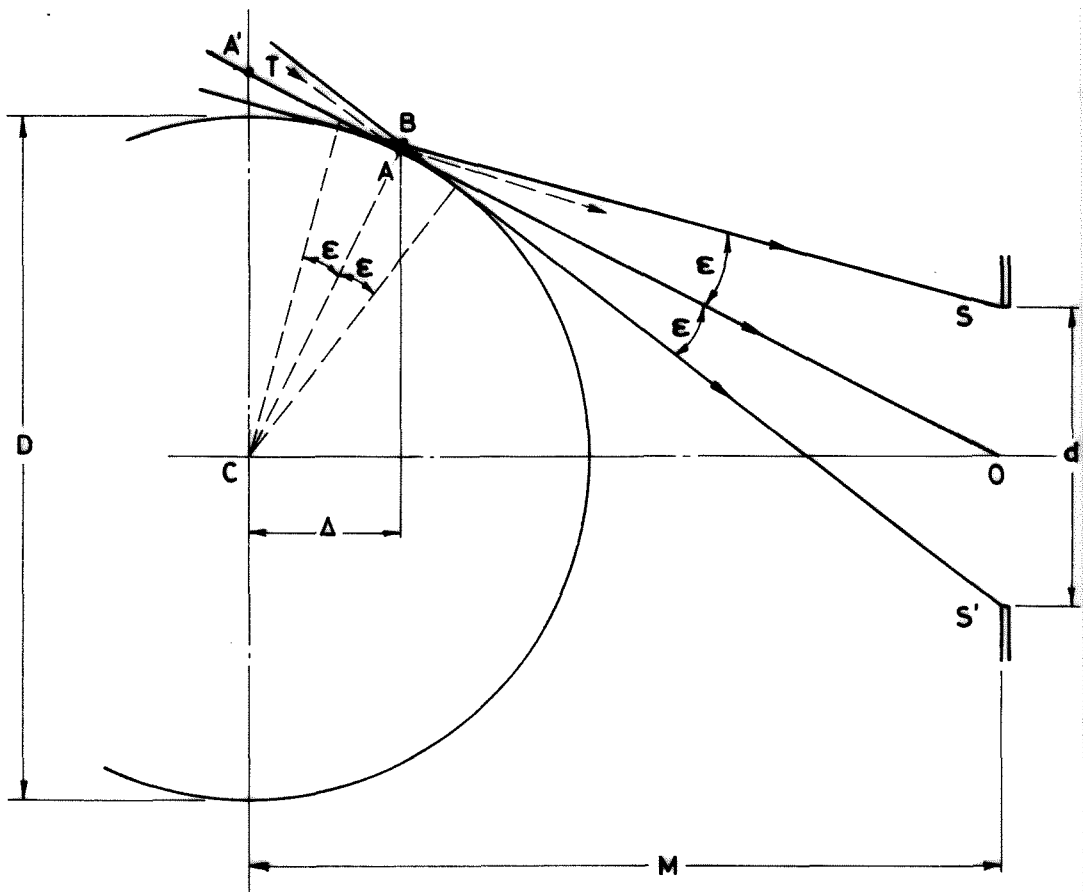


Fig 4.15. Diagrama óptico del efecto de la curvatura del objeto.

por la periferia del diafragma, pueden alcanzar la lente. Esto implica que el punto B es el primero completamente iluminado, mientras que A está en el borde del área de penumbra, existiendo una zona de penumbra de extensión AB. De la observación de la Fig 4.15 se deduce que:

$$\epsilon = \frac{d}{2M}$$

$$AB = \left(\frac{d}{M}\right)^2 \frac{D}{4} .$$

Adimensionalizando con $D/2$ se obtiene:

$$p = \frac{AB}{D/2} = \frac{1}{8} \left(\frac{f}{M}\right)^2 \left(\frac{d}{f}\right)^2$$

Se advierte que p depende de f/M (constante para la configuración empleada) y de d/f (apertura relativa de la lente) mostrándose en la Fig 4.16 la variación de p con d/f (para un valor de $f/M=1/18$).

Fijada una configuración del sistema, al crecer el radio de la zona, aumenta la extensión de la zona de penumbra, AB, lo que supone una disminución de la capacidad de resolución del sistema.

Hay que observar que si se trata de abrir el diafragma para reducir el efecto de la difracción, al aumentar d/M se aumenta la extensión del área de penumbra, con lo que se disminuye la resolución, resultando que las imágenes de objetos que tengan pequeña curvatura presentarán reducida la nitidez de su contorno. Una manera de conseguir una mayor nitidez, es utilizar una iluminación con alta coherencia.

• Reflexión de rayos luminosos en la superficie

En ausencia de reflexión en la superficie del objeto,

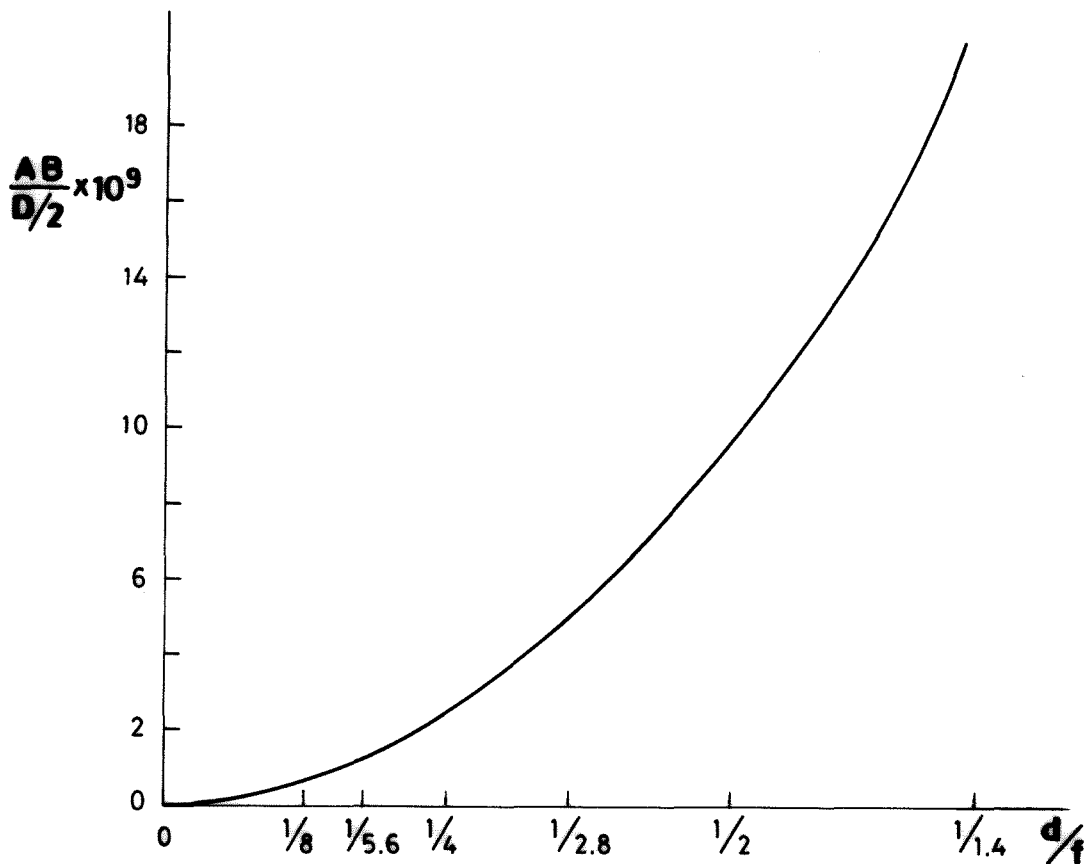


Fig 4.16. Variación de la extensión de la zona de penumbra, AB, en función de la apertura de la lente, d/f (cuando $M/f=18$).

como resultado del fenómeno estudiado anteriormente, el punto A', que corresponde a la imagen física del objeto, está en el borde del área de penumbra A'B' que está fuera del objeto.

Debido a la reflexión en la superficie rayos como el TA pueden llegar a la lente, creando una cierta iluminación en A', aumentando de esta manera el área de penumbra y perdiéndose así la definición de la posición del punto A' en la curva de transición de luz a sombras, en el contorno.

La iluminación difusa o con un ángulo grande de divergencia favorece este fenómeno, que puede contrarrestarse utilizando pequeñas aberturas del diafragma, pero esto disminuye la resolución como resultado de la difracción.

La reflexión en la superficie del cuerpo líquido depende del índice de refracción, n , del líquido y del ángulo de incidencia, α' , calculándose el porcentaje de energía reflejada, R , mediante la fórmula:

$$R = \frac{1}{2} \left| \frac{\sin^2(\alpha - \alpha')}{\sin^2(\alpha + \alpha')} + \frac{\tan^2(\alpha - \alpha')}{\tan^2(\alpha + \alpha')} \right|$$

donde α es el ángulo de refracción:

$$\alpha = \arcsen |\sin \alpha' / n|$$

La variación del porcentaje de energía reflejada, R (para los líquidos empleados) en función del ángulo de incidencia, α' , se muestra en la Fig 4.17.

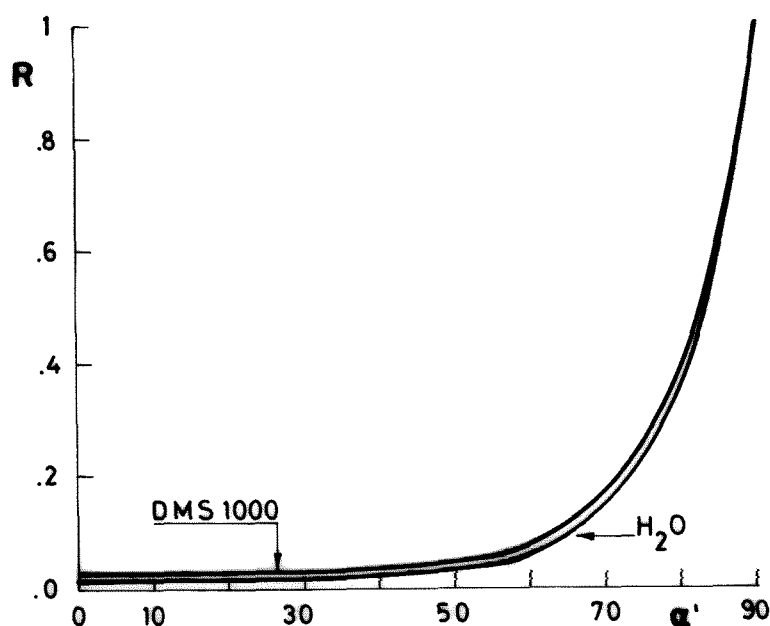


Fig 4.17. Energía reflejada, R , en función del ángulo de incidencia, α' .

• Distancia finita del punto de observación

La convergencia de los rayos luminosos que llegan a la lente es debida a la distancia, finita, a la que está situado el punto de observación, lo que crea unas incorrecciones en las medidas, como son la variación en la posición del plano enfocado y la variación del tamaño del objeto, como muestra la Fig 4.15.

La variación en la posición del plano enfocado, Δ , es:

$$\Delta = \frac{D^2}{4L} \quad ,$$

que en el plano de la lente es Δ' :

$$\Delta' = \frac{D^2}{4L} \cdot s \quad ,$$

donde s es la relación de escala. Tomando para D un valor de 100 mm se obtiene: $\Delta=5.49$ mm y $\Delta'=.024$ mm. El error Δ' puede despreciarse (pues permanece dentro de las tolerancias de enfoque) y enfocar directamente el plano que pasa por el eje de rotación.

La variación en el tamaño del objeto, ΔR , es la diferencia entre la distancia de la imagen del contorno, A' , al eje de rotación, $A'C$, y la verdadera magnitud, R . Adimensionalizando con M y llamando $A'C/M=r'$ y $D/2M=r$ se obtiene:

$$\Delta r = r' - r = r' \left(1 - \frac{1}{\sqrt{r'^2 + 1}} \right)$$

En la Fig 4.18 se muestra la variación de Δr en función de r' , corrección a tener en cuenta en cálculos posteriores.

La determinación de la relación de escala, s , en que opera el sistema, es un punto importante en los casos en que se necesita realizar medidas con precisión. Las ecuaciones del sistema óptico son:

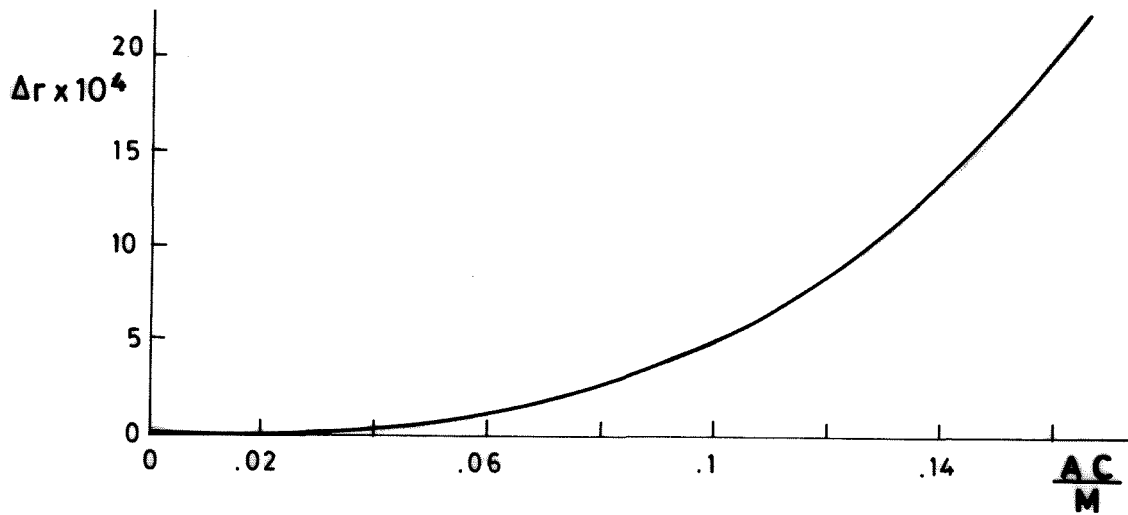


Fig 4.18. Variación del tamaño del objeto, Δr , en función del tamaño aparente, $A'C$.

$$S + S' + H = M$$

$$s = S' / S$$

$$\frac{1}{S} + \frac{1}{S'} = \frac{1}{f}$$

Resolviendo el sistema se obtiene:

$$\frac{(s+1)^2}{s} = \frac{(M-H)}{f},$$

donde M es la distancia entre la película y el plano del objeto, H es la distancia entre los planos principales de la lente, y f la distancia focal.

Conocidas estas magnitudes, la ecuación anterior permite calcular la relación entre las dimensiones de la imagen y el objeto, s .

Para efectuar medidas de gran precisión en verdadera magnitud hay que conocer s con elevada precisión (aproximadamente .02%).

Diferenciando la ecuación anterior se obtiene:

$$\frac{\Delta s}{s} = \frac{s}{s^2+1} \left(\frac{M}{f} \frac{\Delta M}{M} + \frac{H}{f} \frac{\Delta H}{H} + \frac{M-H}{f} \frac{\Delta f}{f} \right)$$

En el caso que $s=1/5$, $f=28$ mm, $M=483$ mm y $H=10$ mm, resulta ser:

$$\frac{\Delta s}{s} = 1.15 \frac{\Delta M}{M} + 1.087 \frac{\Delta f}{f} + .0238 \frac{\Delta H}{H}$$

Esto implica que f y M deberán conocerse con una precisión de $1/10000$ y $1/500$, respectivamente.

A la vista de la complejidad del problema, han sido realizadas una serie de pruebas de comparación, con el objeto de aportar información sobre la influencia de cada uno de estos fenómenos en la imagen obtenida.

En base a los resultados de estas pruebas, se ha adoptado la solución de, por el momento, realizar los experimentos modificando ligeramente el sistema de iluminación, añadiéndole una rejilla que origine unas franjas oscuras paralelas, inclinadas 45° a cada lado del eje de rotación, separadas entre sí 5 mm, y de 1 mm de espesor cada una. Con esta configuración, se reduce el efecto de la reflexión en el borde de la zona, de manera que en las fotografías pueden localizarse una serie de puntos, resultado de la intersección de la zona con las franjas, fácilmente observables, y que muestran la verdadera posición del borde. El fenómeno puede observarse en la Fig 4.19.

Aunque este método es el más sencillo, se puede también hacer otro análisis que permite encontrar la línea de borde en cualquier punto de éste, basado en consideraciones de luminosidad. Se puede decir que la luminosidad de los puntos del contorno está con

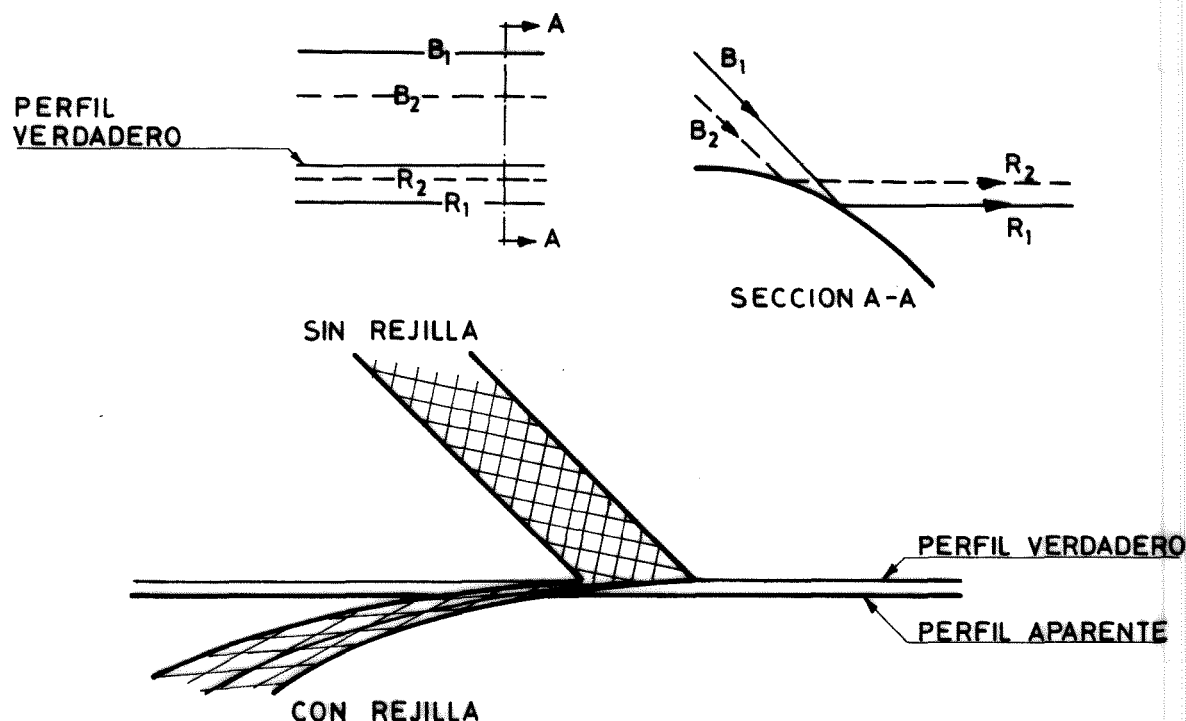


Fig 4.19. Reflexión en la superficie de la zona y efecto de la colocación de las franjas.

trolada por los mecanismos, ya expuestos anteriormente, de difracción en el borde de la zona, reflexión en la superficie de pequeña curvatura, y penumbra creada por la tridimensionalidad del objeto, que ha sido analizada mediante óptica geométrica. Pues bien, podría calcularse la luminosidad creada por cada uno de estos mecanismos en la región del borde, hallar la distribución de iluminación resultante y la luminosidad existente en los puntos del borde, con lo que se habría resuelto el problema. La dificultad mayor aparecería al tratar de encontrar la distribución debida a la difracción en el contorno de la superficie de la zona.

• Cálculo de la forma externa

El primer paso consistirá en hacer las correcciones pertinentes en las posiciones de los puntos del borde de la zona lí-

quida. Como se ha indicado anteriormente, un punto del contorno, $P(r',z)$, es observado a una distancia r' (del eje de rotación) mayor de la que en realidad existe, r , en una cantidad Δr , función de r' .

Las posiciones de los puntos serán las obtenidas digitalizando las fotografías del tipo 1.

Una vez efectuada la corrección de la coordenada r se conocerá la verdadera posición de los puntos del contorno, calculándose la desviación respecto a la ecuación de la curva del contorno predicha por la teoría, por el método de mínimos cuadrados, por ejemplo.

4.4. ANALISIS CUANTITATIVO AUTOMATICO

Este método permite eleborar la información de una manera completamente automática para obtener el campo de velocidades interno y la forma de la zona.

Entre sus características principales cabe destacar la rapidez, la precisión y la objetividad. La rapidez con que se elaboran los datos es debido a realizarse el proceso por ordenador, de una manera automática. La precisión con que se obtienen los resultados depende de la resolución de la digitalización; es decir, del número de pixels por centímetro cuadrado que se utilicen para ello, que se puede variar para conseguir la precisión que se estime conveniente. Al no existir un operador humano que tome parte en el proceso, todas las operaciones se realizan de acuerdo con unos criterios cuantificados que no experimentan variación durante el largo tiempo que requeriría su aplicación a cada imagen, eliminándose de

esta forma la subjetividad existente en el operador al seleccionar los puntos de las trayectorias de los trazadores y del contorno de la zona.

Este método de análisis se materializa en un conjunto de operaciones tal como puede verse en el diagrama de bloques de la Fig 4.20. En el proceso pueden distinguirse cuatro fases: entrada de información, proceso de imágenes, proceso de datos y obtención de los resultados finales.

La primera fase comprende una primera elaboración de los datos en bruto procedentes del Spacelab (fotografías y cintas magnéticas) en la que se identifican y caracterizan las fotografías mediante palabras clave con la información pertinente. Esta primera fase, de organización de la información, es absolutamente necesaria dada la gran cantidad de fotografías que hay que manejar.

La segunda fase, el tratamiento de imágenes por ordenador, comprende una serie de transformaciones de las imágenes extraídas de las fotografías para obtener las coordenadas de los puntos de las trayectorias de los trazadores y del contorno de la zona. Las técnicas a emplear en esta fase, pese a su novedad, están actualmente en un estado de desarrollo tan avanzado que permiten la realización de procesos de imágenes incluso de mayor dificultad que el que aquí se describe.

La tercera fase, el proceso de datos, utiliza las coordenadas de los puntos obtenidos en la fase anterior para determinar el campo de velocidades y la forma externa de la zona.

La última fase comprende el proceso de comparación entre los resultados encontrados en la experimentación y en los análisis

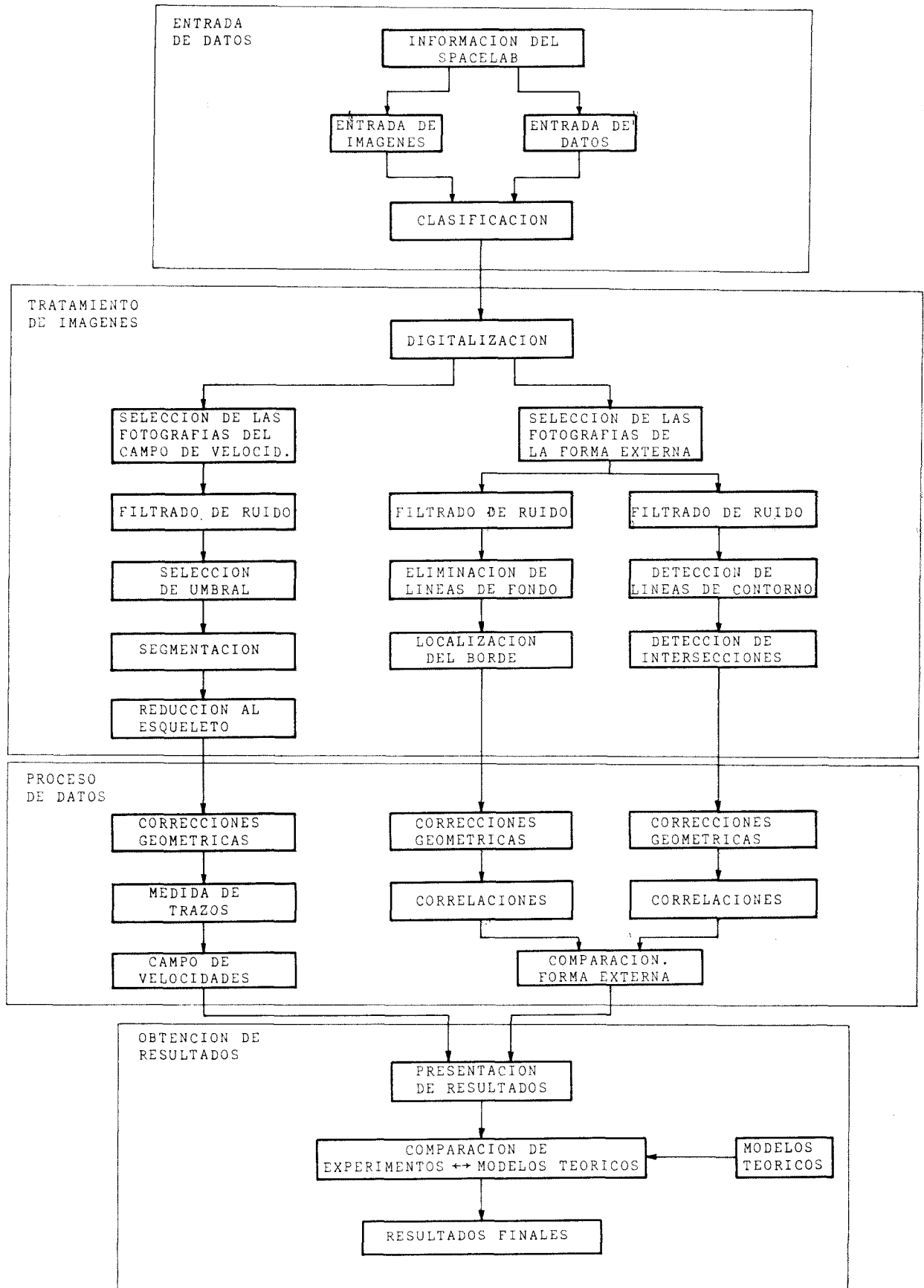


Fig 4.20. Esquema de las operaciones a realizar en el análisis cuantitativo automático.

teóricos, para obtener los resultados finales, que permitirán evaluar la validez y el mérito de la teoría desarrollada.

4.4.1. Entrada de información

El propósito de esta fase es elaborar la información en bruto procedente de la experimentación en el Spacelab para conseguir que su uso posterior sea cómodo y simple. Se trata de efectuar un previo reconocimiento del material para verificar la correcta realización de los experimentos (discriminando la validez de éstos) y construir un archivo en cinta magnética con los datos de los parámetros de funcionamiento y las palabras clave asignadas a cada imagen, que se empleará para el control de los procesos posteriores y la identificación de las fotografías.

La información que se asignará a cada imagen en este archivo estará compuesta en forma de ficha, conteniendo: el número de la imagen, el tiempo, los datos de los parámetros de funcionamiento (velocidad y posición de los discos, temperaturas, etc.) y de unas palabras clave (ver Tabla 4.1) que caracterizarán a las fo

Tabla 4.1

Características de las palabras clave

Palabra clave	Rango de variación	Longitud de campo (bytes)	Descripción
Fase	10	1	Ver Tabla 2.2
Tipo	3	1	1 F. externa, 2 P. meridiano, 3 P. normal.
Calidad	4	1	1 M. buena, 2 Buena, 3 Mala, 4 Desechable.
Asunto	9	1	1 Torbellino, 2 Capa de cortadura, 3

tografías: número de la fase a que pertenece la imagen (2 a 10), el tipo (fotografía tipo 1, 2 ó 3), la calidad (con 4 calificaciones) y el asunto (fenómeno característico mostrado en la fotografía, como capa de cortadura, torbellino, etc.).

La intervención directa por parte del personal investigador se reduce así a la asignación de los valores correspondientes de las dos últimas palabras clave. Organizada la información de esta forma, cada fotografía irá acompañada de 36 bytes si está tomada en Modo Normal y de 22 bytes como máximo si lo está en Modo Selectivo.

4.4.2. Tratamiento de imágenes

El propósito de esta fase es transformar la imagen de manera que se obtenga como resultado la detección de la forma externa y las trayectorias de los trazadores.

El primer paso es digitalizar las fotografías verifica-das, proceso que requiere el empleo de un fotodensitómetro o cualquier otro tipo de aparato digitalizador automático que transforme la intensidad de la luz transmitida por la película en una señal digital con la información de densidad asociada al punto donde se realiza la medida (pixel), como muestra la Fig 4.21 (donde se introducen las variables del problema). La luz que pasa a través de la transparencia es recogida por una lente condensadora y dirigida hacia la superficie del fotodetector. La salida eléctrica del fotodetector se integra en el periodo de tiempo en el que la luz atraviesa una celdilla de muestreo.

La digitalización de una imagen puede describirse como

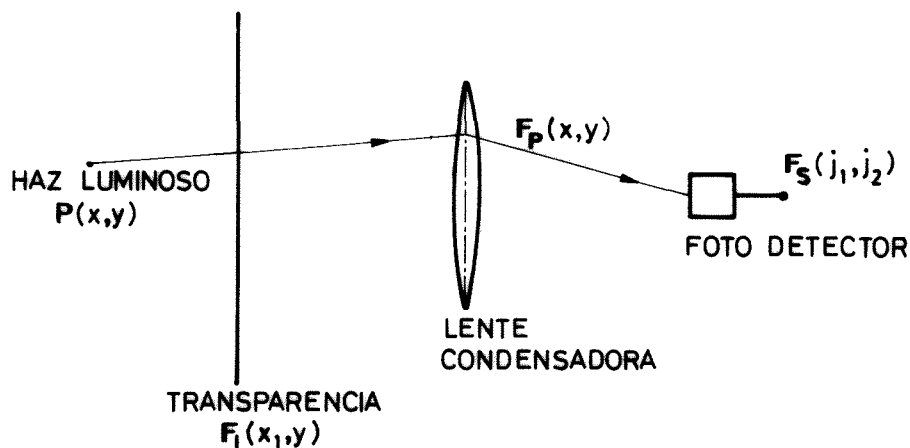


Fig 4.21. Esquema del proceso de digitalización.

un muestreo de ésta realizado en los puntos de una malla, de espaciado Δx , Δy . El muestreo de un punto de la imagen se representa por medio de una función impulso, $P(x,y)$ (por ejemplo, una función delta de Dirac).

La función que representa el muestreo de los puntos de la imagen coincidentes con los de la malla, $S(x,y)$, se construye a partir de las $P(x,y)$ mediante la expresión:

$$S(x,y) = \sum_{j_1=-J_1}^{J_1} \sum_{j_2=-J_2}^{J_2} P(x-j_1\Delta x, y-j_2\Delta y)$$

que indica que $S(x,y)$ está compuesta de $(2J_1+1)(2J_2+1)$ funciones impulso $P(x,y)$ situadas en los puntos de la malla.

La imagen representada por la transparencia puede definirse como una función continua de luminosidad, $F_I(x,y)$, y la imagen captada por el fotodetector, $F_P(x,y)$, es el resultado del muestreo realizado por los haces luminosos

$$F_P = F_I(x,y) S(x,y)$$

$$F_P = \sum_{j_1=-J_1}^{J_1} \sum_{j_2=-J_2}^{J_2} F_I(x,y) P(x-j_1\Delta x, y-j_2\Delta y) \quad .$$

El muestreo numérico de la imagen se obtiene por medio de una integración espacial de $F_S(x,y)$ sobre una celda de tamaño finito. Si la integración se realiza en la superficie del fotodetector, el valor muestreado de la imagen de la celda (j_1, j_2) puede expresarse como:

$$F_S(j_1 \Delta x, j_2 \Delta y) = \int_{j_1 \Delta x - A_x}^{j_1 \Delta x + A_x} \int_{j_2 \Delta y - A_y}^{j_2 \Delta y + A_y} F_I(x,y) P(x-j_1 \Delta x, y-j_2 \Delta y) dx dy ,$$

donde A_x y A_y son las dimensiones máximas de la celda. Esta expresión es válida cuando sólo existe un impulso de muestreo durante el tiempo de integración del detector. La imagen así representada, $F(j_1, j_2)$, puede considerarse como una matriz F de $N_1 \times N_2$ elementos:

$$F = |F(n_1, n_2)| ,$$

donde $1 \leq n_i \leq N_i$ y se ha llamado $n_i = j_i$ por consistencia con la notación estándar. La matriz de imagen puede transformarse en forma de vector columna por medio de la expresión:

$$f = \sum_{n=1}^{N_1} N_n F V_n ,$$

donde V_n es un vector $N_2 \times 1$ y N_n una matriz $N_1 N_2 \times N_1$ definidos como:

$$V_n = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & n-1 \\ 1 & n \\ 0 & n+1 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & N_2 \end{vmatrix} \quad N_n = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & n-1 \\ I & n \\ 0 & n+1 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & N_2 \end{vmatrix}$$

donde 0 es la matriz cuadrada nula de orden N_1 e I es la matriz unidad de orden N_1 . La descripción de la imagen en esta forma vecto-

rial ofrece la ventaja de una notación más compacta y la posibilidad de utilizar resultados derivados de las aplicaciones del proceso de señales unidimensionales.

Para procesar la imagen por medio de un computador digital, es necesario representar las cantidades analógicas por medio de números enteros proporcionales a su amplitud. Esto se realiza comparando las señales analógicas muestreadas con un conjunto de niveles de decisión. Cada nivel de decisión tiene asociado un código binario. Existen una serie de técnicas para determinar los niveles de decisión y de reconstrucción en función del número de niveles de decisión utilizados para la cuantificación, basadas en la minimización de una expresión deseada del error medido entre el valor verdadero y el cuantificado.

La imagen digitalizada puede considerarse como un vector cuyas componentes son la luminancia de la imagen cuantificada en los puntos muestreados (pixels). La resolución de la imagen digitalizada depende del número de pixels por unidad de superficie utilizados en la digitalización y del número de niveles de cuantificación empleados para describir la intensidad de iluminación. En el caso de emplear para captar la imagen una cámara de televisión estándar (625 líneas) se obtendría una precisión en el campo del objeto de ± 0.08 mm., empleando en la digitalización de cada imagen unos 18.000 pixels (180 pixels/cm^2).

Aunque en el curso del proceso de la imagen se reduzca el número de niveles de cuantificación empleados, inicialmente se emplearán 256 niveles (1 byte) para no perder información y poder reproducir con fidelidad cualquier imagen. De esta manera se nece-

sitarían unos 18.100 bytes por imagen.

Las imágenes digitalizadas se almacenarán en una cinta magnética, colocando delante de cada una de ellas la ficha correspondiente. Como se muestra en la Fig 4.20, este tratamiento comprende de una serie de etapas, diferentes según sea el tipo de fotografía. La descripción de dichas etapas es forzosamente genérica, pues la configuración final de los algoritmos encargados de realizarlas es el resultado de una etapa de pruebas y puesta a punto de los mismos, para conseguir el resultado óptimo, dentro de las posibilidades existentes.

Si la imagen a tratar corresponde a una fotografía tipo 1 (forma externa de la zona) el proceso que se podrá realizar es doble: uno, eliminando las líneas de fondo (y calculando la forma externa), y otro no eliminando dichas líneas (a partir de los puntos de intersección de éstos con la línea de la forma externa, calcular ésta). Los resultados obtenidos por ambos métodos podrán compararse, para obtener el resultado final.

En cualquiera de ambos casos el primer paso sería un filtrado para eliminar el ruido existente en la imagen debido a diversas fuentes (reflejos, sensores, grano fotográfico, etc.). El ruido en muchos casos aparece como variaciones discretas de pixels aislados que no están correlacionados espacialmente. Cuando el ruido es de alta frecuencia, los pixels con error aparecen marcadamente diferenciados de los de sus alrededores. Un método para eliminar este ruido está basado en esta observación y consiste en examinar cada pixel, secuencialmente, y si la magnitud de un pixel es mayor, por encima de un valor dado, ϵ , que el promedio de las de sus ve-

cinco, es reemplazado por este valor promedio (ver Fig 4.22), es decir si

$$\left| X - \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 O_i \right| > \epsilon$$

entonces se hace que $X = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 O_i$.

	O_1	O_2	O_3	
	O_8	X	O_4	
	O_7	O_6	O_5	

Fig 4.22. Esquema utilizado para el filtrado de ruido.

El ruido de una imagen generalmente tiene un espectro de frecuencia espacial mayor que los componentes usuales de una imagen normal por no estar correlacionado espacialmente. Un simple filtrado espacial pasa-bajos puede ser efectivo para conseguir la disminución del ruido. Realizando una convolución discreta de la imagen de entrada, F, con una matriz de convolución, H, se obtiene una imagen, Q, dada por la relación:

$$Q(m_1, m_2) = \sum_{n_1} \sum_{n_2} F(n_1, n_2) H(m_1 - n_1 + 1, m_2 - n_2 + 1) .$$

Para conseguir disminuir el ruido H debe tener todas sus componen-tes positivas de forma que filtre las altas frecuencias. Algunas matrices de convolución a emplear en este proceso pueden ser las siguientes:

$$H = \frac{1}{9} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}, \quad H = \frac{1}{10} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}, \quad H = \frac{1}{16} \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{vmatrix}.$$

La eliminación de las líneas de fondo es necesaria para aislar la línea de la forma externa de la zona. Para conseguirlo puede utilizarse el hecho de que estas líneas se repiten con una frecuencia espacial dada. Realizando un filtrado espacial adecuado se lograría eliminar estas líneas.

Para la localización del borde de la zona pueden emplearse diferentes métodos. Para acentuar el borde, la señal eléctrica formada por la imagen puede pasarse por un filtro pasa-altos. También puede realizarse una convolución discreta como la descrita en la ecuación anterior, en la que H realiza un filtrado pasa-altos, que puede ser entre otras como las siguientes:

$$H = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix}, \quad H = \begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix}, \quad H = \begin{vmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 5 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{vmatrix}.$$

También puede emplearse una diferenciación discreta, que puede ser vertical:

$$G(j,k) = F(j,k) - F(j,k+1)$$

u horizontal:

$$G(j,k) = F(j,k) - F(j+1,k),$$

con lo que se acentúan notablemente los puntos de los bordes, porque las diferencias de iluminación de éstos con sus vecinos son mayores.

También puede emplearse un operador * definido como:

$$G(j,k) = *F(j,k) = F(i+1,j)+F(i-1,j)+F(i,j+1)+F(i,j-1)-4F(i,j) ,$$

que es la derivada segunda del campo de la imagen según las direcciones coordenadas, en forma digital. En zonas de la imagen donde la iluminación sea uniforme, G es aproximadamente nula, así como en las zonas de cambio lineal, mientras que tiene valores grandes en las zonas donde haya cambios muy bruscos del nivel de gris (contornos de la imagen). Una vez que se ha conseguido resaltar la posición del borde, puede generarse una imagen de localización de bordes asignando a los pixels cuyo valor $G(j,k)$ esté por debajo de un umbral inferior T_L

$$G(j,k) < T_L$$

un valor determinado de luminancia (negro, por ejemplo), a los que tengan un valor mayor que un umbral superior

$$G(j,k) \geq T_U$$

otro valor (blanco, por ejemplo), y a los pixels que no pertenezcan a las regiones del borde otro valor (gris).

La selección de los umbrales a utilizar debe hacerse durante el propio proceso para conseguir que no sea demasiado alto (y no permita la detección de los bordes de baja amplitud) ni demasiado bajo (y detecte bordes falsos generados por el ruido), y depende del proceso con el que se hayan resaltado los contornos. Como resultado de este proceso se obtendrían una serie de puntos, correspondientes al borde de la zona.

En el caso en que no se eliminen las líneas de fondo sino que se utilicen en el proceso, por algún método de los ya indicados se obtendrá una imagen con todas las líneas presentes en la fo

tografía, es decir, con la línea de borde de la zona y con las de fondo. La detección de los puntos de intersección entre ellas puede realizarse teniendo en cuenta que son puntos en cuyas proximidades el promedio de iluminación es más bajo que en los puntos que pertenecen a sólo una de las líneas.

En las fotografías tipos 2 y 3 (campo de velocidades) habrá de efectuarse un filtrado de ruido análogo al ya descrito. Para mejorar el contraste de las imágenes puede realizarse una transformación de la escala de grises (modificando el histograma de iluminación de la imagen, por ejemplo). En estas fotografías se trata de extraer las trayectorias de los trazadores. La imagen de éstos es una línea luminosa sobre un fondo oscuro relativamente uniforme. El proceso anterior mejora el contraste de manera que haciendo una selección de umbral se podrán diferenciar las trayectorias del fondo uniforme, con lo que se obtendría una imagen en la que las trayectorias aparecerían con pixels de un nivel más alto (puntos blancos) que los del fondo uniforme (puntos negros); esto es, una imagen de trazos luminosos sobre fondo oscuro uniforme.

Para poder discriminar las trayectorias de los trazadores, hay que individualizarlas, proceso que se designa como segmentación. En las fotografías, las trayectorias de los trazadores aparecen cruzándose, lo que puede originar problemas cuando haya que calcular la longitud de éstas. Para que en el punto de intersección de dos trayectorias no exista confusión sobre la continuación de la trayectoria que se está siguiendo, se empleará el hecho de que la tangente a ésta en el punto de intersección (según las dos posibles direcciones) varía en menos que una cantidad prefijada res-

pecto al punto anterior al de la intersección. La tangente a la trayectoria puede calcularse por diferentes métodos, uno de los cuales es comparar (por medio del producto lógico) una muestra de pixels (ventana) cuyo centro sea el punto considerado con una serie de máscaras como las siguientes:

$$H_1 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}, \quad H_2 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}, \quad H_3 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}, \quad H_4 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix},$$

que representan las direcciones E, NE, N, NO, respectivamente.

El proceso de reducción al esqueleto consiste en reducir las trayectorias, que tienen en la imagen un espesor finito, a su línea media para poder extraer las coordenadas de los puntos que las forman.

4.4.3. Proceso de datos

En el caso del campo de velocidades con las coordenadas de los puntos halladas como resultado del proceso de imágenes se hacen las correcciones a la posición de los puntos, el cálculo de la longitud de los trazos y del campo de velocidades como se ha descrito en 4.3.3.1.

Para determinar la forma externa de la zona se emplean los resultados obtenidos por los dos procedimientos descritos. Si se utiliza el primero se conocen las coordenadas de los puntos del contorno de la zona, y si se utiliza el segundo, las coordenadas de unos 26 puntos. Puede calcularse en cada caso la curva que da la forma de la superficie por medio, por ejemplo, del ajuste por mínimos cuadrados y comparar los resultados así obtenidos.

4.4.4. Obtención de resultados

Los resultados proporcionados por el ordenador, tanto los intermedios (imágenes transformadas y coordenadas de los puntos de las trayectorias) como los finales (ecuación de la forma externa de la zona y campo de velocidades), pueden presentarse por medio de una terminal gráfica para realizar las comprobaciones y análisis pertinentes.

Con esto no se completaría el proceso de investigación, ya que lo que se pretende es comparar los resultados experimentales con los obtenidos por medio de los modelos teóricos, para comprobar la validez de éstos. Esta comparación puede realizarse de una forma totalmente automática, por medio de ordenador, calculando el grado de correlación entre los datos empíricos y los teóricos (dados, respectivamente, en forma de valores discretos y expresiones analíticas).

APENDICE

FORMAS DE EQUILIBRIO Y ESTABILIDAD DE LAS ZONAS LIQUIDAS
FLOTANTES ENTRE DISCOS DIFERENTES

APENDICE

A.1. FORMAS DE EQUILIBRIO Y ESTABILIDAD DE LAS ZONAS LIQUIDAS FLOTANTES ENTRE DISCOS DIFERENTES.

La forma de la superficie externa $r(z)$ de una zona líquida mantenida en equilibrio estable entre dos discos paralelos y coaxiales de diferente diámetro (Fig. A.1) sólo depende de tres parámetros

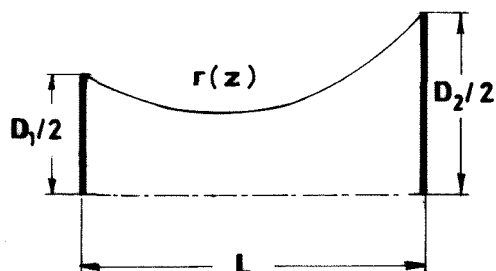


Fig. A.1. Esquema de zona flotante con discos desiguales.

tres adimensionales: $L/D_1 = \Lambda$, $V/D_1^3 = v$ y $D_2/D_1 = a$. La solución $r(z; \Lambda, v, a)$ puede expresarse en forma paramétrica según se indica en la Tabla 1, donde se han añadido otras funciones de interés, como el área de la superficie externa y la presión interior.

Los límites de estabilidad se obtienen de la condición de Jacobiano nulo:

$$\frac{\partial(\Lambda, v, a)}{\partial(\rho_1, \rho_2, \alpha)} = 0$$

Esta ecuación es la de una superficie $f(\Lambda, v, a) = 0$ que separa las regiones de estabilidad e inestabilidad. Para $a = 1$ este límite ha sido calculado numéricamente y se incluyó en el Informe Final de 1977; en la Fig. A.2 se presenta en forma muy resumida gran parte de los resultados obtenidos. Sería deseable volver a resolver el problema para otros valores de a , por ejemplo $a = 1.1$, 2 y 10, pero el cálculo resulta ser demasiado laborioso.

Tabla A.1. Solución paramétrica de las formas de equilibrio de una zona líquida flotante entre discos desiguales.

$$A(\varrho_1, \varrho_2, \alpha) = \frac{1}{2} \frac{B(\varrho_2, \alpha) - B(\varrho_1, \alpha)}{A(\varrho_1, \alpha)}$$

$$V(\varrho_1, \varrho_2, \alpha) = \frac{1}{2} \frac{C(\varrho_2, \alpha) - C(\varrho_1, \alpha)}{A^3(\varrho_1, \alpha)}$$

$$u(\varrho_1, \varrho_2, \alpha) = \frac{A(\varrho_2, \alpha)}{A(\varrho_1, \alpha)}$$

$$r(\varrho, \varrho_1, \varrho_2, \alpha) = \frac{1}{2} \frac{A(\varrho, \alpha)}{A(\varrho_1, \alpha)}$$

$$z(\varrho, \varrho_1, \varrho_2, \alpha) = \frac{1}{2} \frac{B(\varrho, \alpha)}{A(\varrho_1, \alpha)}$$

$$\psi(\varrho_1, \varrho_2, \alpha) = \frac{1}{2} \frac{D(\varrho_2, \alpha) - D(\varrho_1, \alpha)}{A^2(\varrho_1, \alpha)}$$

$$\rho(\varrho_1, \varrho_2, \alpha) = \frac{4A(\varrho_1, \alpha)}{1 + \cos \alpha}$$

Las funciones A, B, C y D vienen definidas por:

$$A(\varrho, \alpha) = (1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \varrho)^{1/2}$$

$$B(\varrho, \alpha) = \cos \alpha F(\varrho, \alpha) + E(\varrho, \alpha)$$

$$C(\varrho, \alpha) = \pi [\sin^2 \alpha \sin \varrho \cos \varrho A(\varrho, \alpha) - \cos \alpha B(\varrho, \alpha) + 2(1 + \cos \alpha)^2 E(\varrho, \alpha)] / 12$$

$$D(\varrho, \alpha) = \pi(1 + \cos \alpha) E(\varrho, \alpha)$$

donde F y E son las integrales elípticas de primera y segunda especie (conviene utilizar sus desarrollos en serie para el cálculo numérico)

$$F(\varrho, \alpha) = \int_0^\varrho \frac{dt}{(1 - \sin^2 \alpha \sin^2 t)^{1/2}} = \varrho + \frac{\sin^2 \alpha}{4} \left(\varrho - \frac{\sin 2\varrho}{2} \right) + \frac{9 \sin^4 \alpha}{64} \left[\varrho - \frac{\sin 2\varrho}{2} \left(1 + \frac{2}{3} \sin^2 \varrho \right) \right]$$

$$E(\varrho, \alpha) = \int_0^\varrho (1 - \sin^2 \alpha \sin^2 t)^{1/2} dt = \varrho - \frac{\sin^2 \alpha}{4} \left(\varrho - \frac{\sin 2\varrho}{2} \right) - \frac{3 \sin^4 \alpha}{64} \left[\varrho - \frac{\sin 2\varrho}{2} \left(1 + \frac{2}{3} \sin^2 \varrho \right) \right]$$

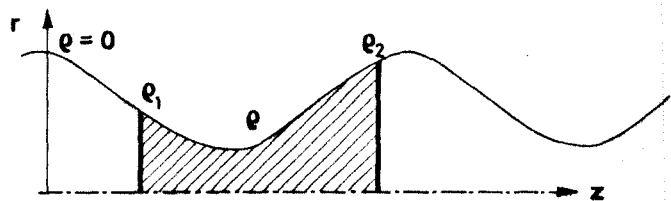
Los límites de variación de los cuatro parámetros que determinan cada solución son (según el esquema adjunto):

$$0 \leq \alpha \leq \pi$$

$$0 \leq \varrho_1 \leq \pi$$

$$\varrho_1 \leq \varrho_2 \leq \varrho_1 + \pi$$

$$\varrho_1 \leq \varrho \leq \varrho_2$$



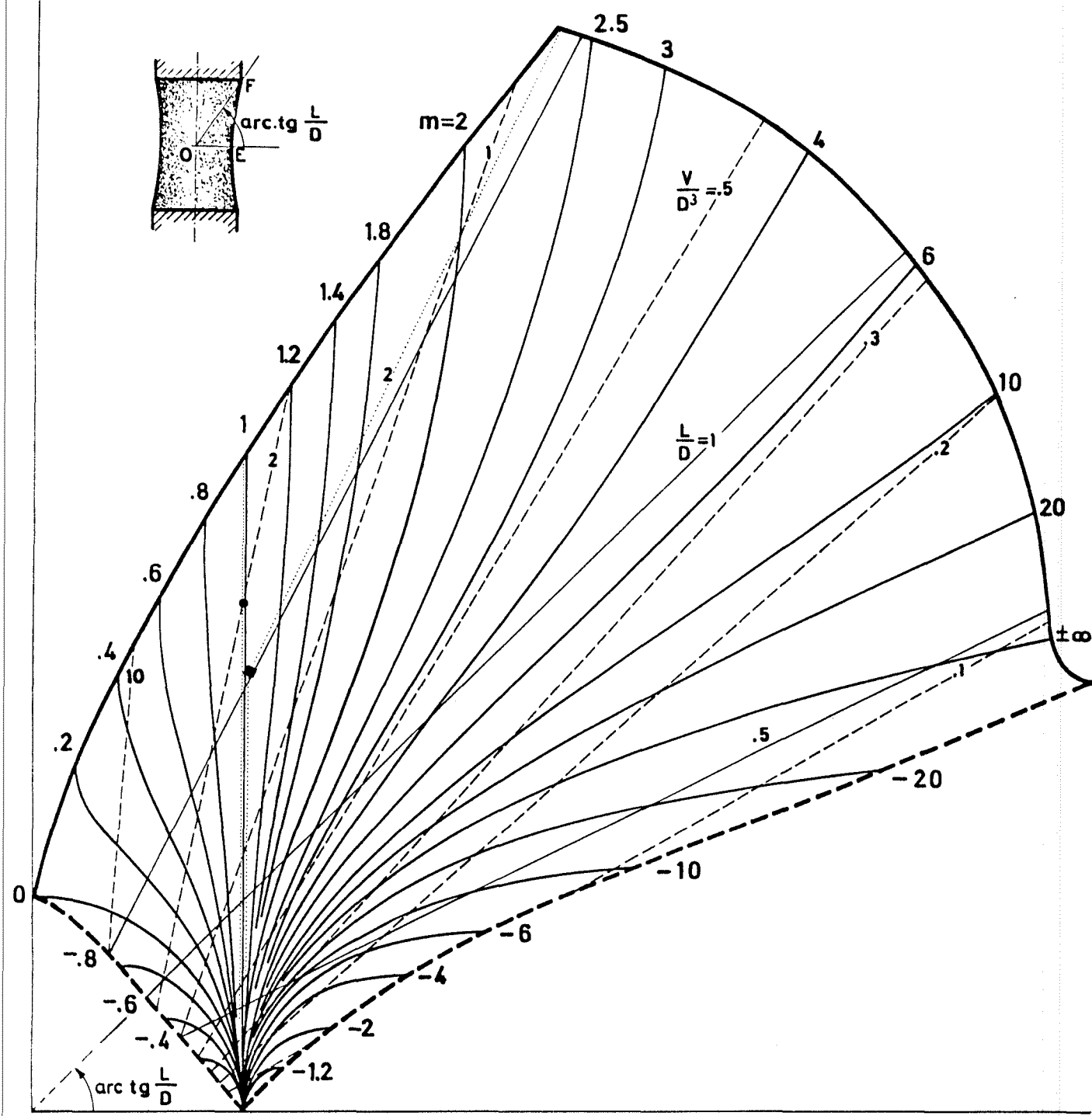


Fig. A.2. Resumen de la hidrostática de las zonas flotantes. Para un diámetro de los discos soporte D , una separación entre ellos L , y un volumen de líquido V , se obtiene un punto en la figura, que (según se detalla) determina la forma de la superficie libre. Las evoluciones casi estacionarias a volumen o longitud constantes se van siguiendo a lo largo de las curvas $V/D^3 = \text{cte}$ ó $L/D = \text{cte}$, respectivamente. Al llegar al límite de estabilidad la zona se rompe.

..... Sucesión de estados de equilibrio a seguir en los dos primeros experimentos en el Spacelab (● ensayo 1, ■ ensayo 2).